



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ

**Μέτρηση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου  
παραγόμενου από γεννήτριες ηλεκτροστατικών  
εκφορτίσεων**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

Δημήτριος Ν. Κουλοφούτος

**Καθηγητής :** Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος

**Επιβλέπων:** Γεώργιος Π. Φώτης

Αθήνα, Νοέμβριος 2005



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ

126

**Μέτρηση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου παραγόμενου  
από γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

Δημήτριος Ν. Κουλοφούτος

**Καθηγητής :** Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος

**Επιβλέπων:** Γεώργιος Π. Φώτης

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 24<sup>η</sup> Νοεμβρίου 2005.

Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος  
Καθηγητής

Περικλής Δ. Μπούρκας  
Καθηγητής

Φραγκίσκος Β. Τοπαλής  
Αναπληρωτής Καθηγητής

Αθήνα, Νοέμβριος 2005

*Στην οικογένειά μου*

Copyright © Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο  
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

# Περιεχόμενα

	<b>Σελίδα</b>
<b>Περιεχόμενα</b>	i
<b>Πρόλογος</b>	iv
<b>Περίληψη</b>	vii
<b>Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή στην ηλεκτροστατική εκφόρτιση</b>	
1.1 Γενικά για την ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα	1
1.2 Η ηλεκτροστατική εκφόρτιση (Electrostatic charge)	3
1.2.1 Τριβοηλεκτρικό φαινόμενο	3
1.2.2 Ηλεκτροστατική φόρτιση εξ επαγωγής	6
1.3 Η ηλεκτροστατική εκφόρτιση σε ηλεκτροτεχνικό εξοπλισμό και τα μέτρα προστασίας που μπορούν να ληφθούν	7
1.3.1 Ορισμοί ANSI	7
1.3.2 Οι επιπτώσεις σε ηλεκτροτεχνικό εξοπλισμό	10
1.3.2 Μέτρα προστασίας του ηλεκτροτεχνικού εξοπλισμού	10
1.4 Μοντέλα για την ηλεκτροστατική εκφόρτιση	12
1.4.1 Γενικά	12
1.4.2 Αξιολόγηση του Human Body Model	14
<b>Κεφάλαιο 2 Πρότυπο IEC 61000-4-2</b>	
2.1 Σκοπός	15
2.2 Εξοπλισμός δοκιμών	15
2.2.1 Γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκκενώσεων	15
2.2.2 Περιγραφή του χώρου δοκιμών	18
2.2.3 Διάταξη δοκιμών	18
2.3 Παράμετροι ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης	19
2.4 Τι ορίζει το πρότυπο ANSI για τις κυματομορφές του ρεύματος εκφορτίσεως	19
2.4.1 Δοκιμές ESD μέσω αέρα ή επαφής	20
2.4.2 Ρεύμα ESD σύμφωνα με το πρότυπο ANSI	20
<b>Κεφάλαιο 3 Βιβλιογραφική ανασκόπηση</b>	
3.1 Σκοπός	22
3.2 Το ηλεκτρικό δίπολο	22
3.3 Πεδιακή ανάλυση της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης	23
3.3.1 Αναλυτική επίλυση –Εγγύς και μακρινό πεδίο	23
3.4 Η μεταβολή του πεδίου σε συνάρτηση με την απόσταση κατά την ηλεκτροστατική εκφόρτιση	24
3.5 Μεταβατικά ηλεκτρομαγνητικά πεδία προερχόμενα από ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης	27
3.5.1 Θεωρητική προσέγγιση	27
3.5.2 Πειραματική προσέγγιση	29

3.5.3	Συγκριτικά αποτελέσματα	31
3.5.3.1	Στο μονόπολο	31
3.5.3.2	Στο ημικύκλιο	33
3.5.4	Συμπερασματικά	38
3.6	Η ενέργεια της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης	38
3.7	Ρεύματα και πεδία ηλεκτροστατικής εκφόρτισης σε κατακόρυφο επίπεδο ζεύξης (VCP) και σε οριζόντιο επίπεδο ζεύξης (HCP)	39
3.7.1	Ανάλυση του κατακόρυφου επιπέδου ζεύξης (VCP)	39
3.7.1.1	Το εγχυόμενο ρεύμα	39
3.7.1.2	Η δομή του πεδίου	41
3.7.1.3	Μοντέλο συζευγμένης γραμμής μεταφοράς	42
3.7.1.4	Μοντέλο γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων	43
3.7.2	Ανάλυση του οριζόντιου επιπέδου ζεύξης (HCP)	43
3.7.2.1	Εξοπλισμός – Διάταξη	43
3.7.2.2	Τα πρώτα ns	43
3.7.2.3	Πυκνότητα ρεύματος	44
3.7.2.4	Με την πάροδο του χρόνου	45
3.8	Ανασκόπηση πειραματικών διατάξεων	46
<b>Κεφάλαιο 4</b>	<b>Πειραματική διάταξη</b>	
4.1	Εισαγωγή	49
4.2	Ο εξοπλισμός του εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων	49
4.3	Η περιγραφή της πειραματικής διάταξης	49
4.3.1	Γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων (ESD generators)	53
4.3.1.1	Γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων NSG-433	53
4.3.1.2	Γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων NSG-438	54
4.3.2	Ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης	57
4.3.3	Ομοαξονικά καλώδια υψηλής συχνότητας	58
4.3.4	Εξασθενητής (attenuator)	58
4.3.5	Παλμογράφος Tektronix TDS 7254B	59
4.3.6	Αισθητήρας μέτρησης της έντασης E του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου	60
4.3.7	Τροφοδοτικό LG GP 4303D	63
4.3.8	Θωρακισμένος θάλαμος (transient immunity room)	63
4.3.9	Εποπτική παρουσίαση της πειραματικής διάταξης	64
<b>Κεφάλαιο 5</b>	<b>Πειραματικά αποτελέσματα</b>	
5.1	Εισαγωγή	65
5.2	Γραφικές παραστάσεις	65
5.2.1	Εκφορτίσεις επαφής υπό τάση +2 kV με τη γεννήτρια NSG-433	66
5.2.2	Εκφορτίσεις επαφής υπό τάση -2 kV με τη γεννήτρια NSG-433	78
5.2.3	Εκφορτίσεις επαφής υπό τάση +4 kV με τη γεννήτρια NSG-433	90
5.2.4	Εκφορτίσεις επαφής υπό τάση -4 kV με τη γεννήτρια NSG-433	102
5.2.5	Εκφορτίσεις επαφής υπό τάση +2 kV με τη γεννήτρια	114

	NSG-438	
5.2.6	Εκφορτίσεις επαφής υπό τάση -2 kV με τη γεννήτρια NSG-433	126
5.2.7	Εκφορτίσεις επαφής υπό τάση +4 kV με τη γεννήτρια NSG-438	138
5.2.8	Εκφορτίσεις επαφής υπό τάση -4 kV με τη γεννήτρια NSG-438	150
5.3	Πειραματικά αποτελέσματα	162
<b>Κεφάλαιο 6 Σύγκριση αποτελεσμάτων</b>		
6.1	Εισαγωγή	166
6.2	Σύγκριση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου των δυο γεννητριών σε κάθε σημείο παρατήρησης για εκφορτίσεις επαφής	166
6.2.1	Συγκρίσεις για τάση φόρτισης +2 kV	167
6.2.2	Συγκρίσεις για τάση φόρτισης -2 kV	171
6.2.3	Συγκρίσεις για τάση φόρτισης +4 kV	175
6.2.4	Συγκρίσεις για τάση φόρτισης -4 kV	179
6.3	Σύγκριση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου για την ίδια γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων στην ίδια κατεύθυνση αλλά με αντίθετη τάση φόρτισης.	183
6.3.1	Γεννήτρια NSG-433	183
6.3.2	Γεννήτρια NSG-438	191
6.4	Σύγκριση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου και για τις τρεις κατευθύνσεις για την ίδια γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων.	199
6.4.1	Γεννήτρια NSG-433	199
6.4.2	Γεννήτρια NSG-438	205
6.5	Σύγκριση ηλεκτρικού πεδίου και ρεύματος εκφόρτισης	210
6.5.1	Γεννήτρια NSG-433	210
6.5.2	Γεννήτρια NSG-438	212
6.6	Μέγιστες τιμές ηλεκτρικού πεδίου (E) συναρτήσει της απόστασης για κάθε κατεύθυνση ξεχωριστά για εκφορτίσεις επαφής υπό τάσεις $\pm 2$ kV και $\pm 4$ kV με τις γεννήτριες NSG-433 και NSG-438	214
6.6.1	Συγκρίσεις για τάσεις φόρτισης $\pm 2$ kV	214
6.6.2	Συγκρίσεις για τάσεις φόρτισης $\pm 4$ kV	216
6.7	Μέγιστες τιμές ηλεκτρικού πεδίου (E) συναρτήσει της απόστασης για εκφορτίσεις επαφής υπό τάσεις $\pm 2$ kV και $\pm 4$ kV με τις γεννήτριες NSG-433 και NSG-438	218
6.7.1	Συγκρίσεις για τάσεις φόρτισης $\pm 2$ kV	219
6.7.2	Συγκρίσεις για τάσεις φόρτισης $\pm 4$ kV	220
6.8	Συμπεράσματα	217
<b>Η επόμενη μέρα</b>		225
<b>Βιβλιογραφία</b>		227
<b>Παράρτημα</b>		230

# Πρόλογος

---

Η εργασία αυτή αποτελεί τη διπλωματική εργασία του φοιτητή Κουλοφούτου Δημητρίου για την απόκτηση του διπλώματος του Ηλεκτρολόγου Μηχανικού και Μηχανικού Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Αντικείμενο της εργασίας αυτής είναι η μέτρηση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, που παράγεται από ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν δύο γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων και έγιναν μετρήσεις που παραγόμενου ηλεκτρικού πεδίου από το σημείο εκφόρτισης σε διαφορετικές, κάθετες μεταξύ τους κατευθύνσεις και σε διαφορετικές αποστάσεις του αισθητήρα μέτρησης ηλεκτρικού πεδίου. Αναφέροντας σημείο εκφόρτισης ή στόχος, εννοείται ο ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης. Ο ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης τοποθετείται στο κέντρο γειωμένης μεταλλικής πλάκας, η οποία βρίσκεται στο εσωτερικό ανηχικού θαλάμου. Πραγματοποιήθηκαν με τις γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων εκφορτίσεις επαφής για τάσεις  $\pm 2$  kV και  $\pm 4$  kV και εξήχθησαν μέσω παλμογράφου γραφήματα της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου (E) και του ρεύματος εκφόρτισης. Για την αποφυγή ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών ο παλμογράφος ήταν απομονωμένος από την πειραματική διάταξη στο δωμάτιο ελέγχου (control room) του ανηχικού θαλάμου. Τα πειραματικά δεδομένα επεξεργάστηκαν στο πρόγραμμα Matlab και ακολούθησε σύγκριση αυτών και εξαγωγή συμπερασμάτων. Ακολουθεί μια σύντομη περιγραφή των θεμάτων που καλύπτονται σε κάθε κεφάλαιο και συγκεκριμένα:

Στο **Κεφάλαιο 1** παρατίθενται γενικά στοιχεία που αφορούν την ηλεκτροστατική εκφόρτιση και δίνονται οι απαιτούμενοι ορισμοί, που επιτρέπουν να γίνει καλύτερα κατανοητό το προς εξέταση φαινόμενο. Επιπρόσθετα αναφέρονται τρόποι δημιουργίας ηλεκτροστατικής φόρτισης, καθώς και μέτρα τα οποία μπορούν να ληφθούν για την προστασία του ηλεκτροτεχνικού εξοπλισμού.

Στο **Κεφάλαιο 2** περιγράφεται το διεθνές Πρότυπο IEC 61000-4-2. Το Πρότυπο αυτό σχετίζεται με τη μέθοδο και τις διαδικασίες, που πρέπει να ακολουθηθούν για την διενέργεια της δοκιμής ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων στα ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά προϊόντα. Επίσης γίνεται αναφορά στο Πρότυπο ANSI C63 16\_1993, που αποτελεί την αντίστοιχη έκδοση του IEC 61000-4-2 σύμφωνα με τα Αμερικανικά Πρότυπα και παρουσιάζονται οι κύριες διαφορές τους.

Στο **Κεφάλαιο 3** παρουσιάζεται η μοντελοποίηση της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης με βάση το στοιχειώδες ηλεκτρικό δίπολο και δίνονται οι αναλυτικές εκφράσεις, τόσο για το ηλεκτρικό, όσο και το μαγνητικό πεδίο, αναλύεται η θεωρία μεταβατικών μαγνητικών πεδίων προερχόμενων από ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, αναφέρονται στοιχεία από μελέτες που έχουν γίνει στο παρελθόν σχετικά με το πώς μεταβάλλεται το πεδίο σε συνάρτηση με την απόσταση και την κατεύθυνση σε σχέση με το σημείο εκφόρτισης και τέλος γίνεται ανάλυση του οριζόντιου και του κατακόρυφου επιπέδου ζεύξης.

Στο **Κεφάλαιο 4** παρατίθεται αναλυτικά και με φωτογραφικό υλικό η πειραματική διάταξη, καθώς και ο εργαστηριακός εξοπλισμός, που είναι διαθέσιμος στο εργαστήριο Υψηλών Τάσεων για τη διεξαγωγή του εν λόγω πειράματος.

Στο **Κεφάλαιο 5** παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα. Τα γραφήματα της έντασης  $E$  του ηλεκτρικού πεδίου για διαφορετικές κατευθύνσεις και αποστάσεις του αισθητήρα από το στόχο που παρουσιάζονται προέκυψαν από εκφορτίσεις επαφής με τις δυο γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων NSG-433 και NSG-438 για τάσεις  $\pm 2$  kV και  $\pm 4$  kV. Η επεξεργασία των μετρήσεων έγινε με τη χρήση κατάλληλων προγραμμάτων στο Matlab.

Στο **Κεφάλαιο 6** παρατίθενται σε κοινά διαγράμματα οι συγκρίσεις μεταξύ των μετρήσεων που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 5 και γίνεται αναλυτική περιγραφή των συμπερασμάτων που προκύπτουν από αυτά.

Τέλος, στο **Κεφάλαιο 7** γίνεται αναφορά στα μελλοντικά πειράματα που χρειάζεται να πραγματοποιηθούν προκειμένου να εξαχθούν πιο εμπειριστωμένα



συμπεράσματα, όσον αφορά το ζήτημα του παραγόμενου πεδίου από ηλεκτροστατική εκφόρτιση.

Στο σημείο αυτό θεωρώ υποχρέωσή μου να ευχαριστήσω θερμά όσους συνέδραμαν στην εκπόνηση αυτής της εργασίας και συγκεκριμένα:

Τον κ. Ιωάννη Αθ. Σταθόπουλο, καθηγητή του Τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου για τη συμπαράστασή του και το ευχάριστο εργασιακό περιβάλλον που μου παρείχε.

Τον κ. Γεώργιο Π. Φώτη, Υποψήφιο Διδάκτορα μηχανικό του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου για την βοήθεια, καθοδήγηση και συμπαράστασή του, καθώς και για την πολύ καλή συνεργασία που είχαμε κατά τη διάρκεια της διεξαγωγής της μελέτης.

Τον κ. Ιωάννη Φ. Γκόνο, διδάκτορα μηχανικό του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, που πρόθυμα προσέφερε τη βοήθειά του και τις γνώσεις του πάνω σε θέματα προγραμματισμού που αφορούσαν τη διπλωματική μου εργασία και κυρίως πάνω σε θέματα του προγράμματος Matlab.

Το συνάδελφό μου κ. Ανδρέα Ραπανάκη, με τον οποίο συνεργάστηκα καθ' όλη τη διάρκεια των πειραμάτων και αντάλλαξα χρήσιμες πληροφορίες για να φτάσει η παρούσα εργασία στην τελική της μορφή.

Την κυρία Νικολέττα Ηλία υπεύθυνη του εργαστηρίου για την βοήθεια στην πραγματοποίηση του πειράματος και της χρήσης του εξοπλισμού.

Όλα τα μέλη του εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων και ιδιαίτερα τον κ. Χρήστο Ηλία για την τεχνική υποστήριξη στη διεξαγωγή του πειράματος.

Τέλος, δε θα πρέπει να παραλείψω να ευχαριστήσω τους γονείς μου για την ηθική και οικονομική συμπαράσταση που μου προσέφεραν όλα αυτά τα χρόνια των σπουδών μου.

---

## Περίληψη

---

Σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση του παραγόμενου ηλεκτρικού πεδίου προερχόμενο από ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις. Η μελέτη του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου χρήζει ιδιαίτερας προσοχής λόγω των επαγόμενων τάσεων που δημιουργεί και που μπορούν να επηρεάσουν τα αποτελέσματα δοκιμών που διενεργούνται σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61000-4-2.

Για αυτό το λόγο και προκειμένου να μελετήσουμε τη συμπεριφορά της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κατασκευάστηκε πειραματική διάταξη και μετρήθηκε το παραγόμενο ηλεκτρικό πεδίο σε διαφορετικές αποστάσεις και ως προς τρεις κατευθύνσεις, σε σχέση με το σημείο εκφόρτισης, χρησιμοποιώντας δύο διαφορετικά μοντέλα γεννητριών. Οι μετρήσεις οι οποίες διεξήχθησαν έγιναν με τους αισθητήρες ηλεκτρικού πεδίου του καθηγητή του Πανεπιστημίου Missouri – Rolla David Pommerenke και με τον ομοαξονικό προσαρμοστή (Pellegrini target) τοποθετημένο σε γειωμένη μεταλλική πλάκα. Κατά τη διάρκεια του πειράματος έγιναν εκφορτίσεις επαφής για τάσεις  $\pm 2$  kV και  $\pm 4$  kV.

Το αποτέλεσμα των παραπάνω πειραμάτων ήταν ότι διαφορετικές ηλεκτροστατικές γεννήτριες παράγουν στα ίδια σημεία διαφορετικό ηλεκτρικό πεδίο κατά την ηλεκτροστατική εκφόρτιση. Επιπλέον καταγράφηκε η μείωση της μέγιστης τιμής της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, συναρτήσει της απόστασης από το σημείο εκφόρτισης.

---

## Λέξεις κλειδιά

---

Ηλεκτρομαγνητική ατρωσία, γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, Πρότυπο IEC 61000-4-2, ένταση ηλεκτρικού πεδίου, ηλεκτροστατική εκφόρτιση, γειωμένη μεταλλική πλάκα, ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης, ανηχικός θάλαμος, αισθητήρες ηλεκτρικού πεδίου και εκφορτίσεις επαφής.

## Abstract

---

This diploma thesis attempts to investigate the radiating electric field, which is produced by electrostatic discharges. The study of the produced electromagnetic field is very crucial to be made, due to the fact that the induced voltages may affect the test results, which are conducted according to the IEC 61000-4-2.

For this reason and in order to study the behavior of the strength of the electric field an experimental setup was constructed and the produced electric field was measured along three directions and for various distances from the discharge point, using two different ESD generators. The measurements, which were conducted, were made using David Pommerenke's -Professor, University of Missouri – Rolla- electric field sensors, when the Pellegrini target was mounted on a grounded metal plate. The experiment was made for contact discharges at  $\pm 2$  kV and  $\pm 4$  kV.

The results of this experiment were that for the same point from the discharge point different electrostatic discharge generators were producing different electric field, during the ESD event. Also, it was observed that the maximum values of the electric field strength was induced as the distance from the discharge point was increased.

## Key words

---

Electromagnetic immunity, ESD generators, IEC 61000-4-2, electric field strength, Pellegrini target, electrostatic discharge (ESD), grounded metal plate, anechoic chamber, electric field sensors and contact discharge.

# Κεφάλαιο 1

## Εισαγωγή στην ηλεκτροστατική εκφόρτιση

### 1.1 Γενικά για την ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα

Η ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα (Electromagnetic Compatibility, EMC), αποτελεί ένα πεδίο μελέτης του πώς εφαρμόζεται η βασική φυσική σε σύνθετα ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά κυκλώματα, με σκοπό τη δυνατότητα αυτών να συνυπάρχουν αρμονικά. Εάν επιτυγχάνεται αυτό τότε τα συστήματα θεωρείται ότι εκτελούν τις λειτουργίες τους με ικανοποιητικό τρόπο.

Το φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής ενός συστήματος σε ένα τμήμα του ή κάποιο άλλο σύστημα, είναι γνωστό από τότε που άρχισε η ανάπτυξη των ηλεκτρικών συστημάτων πριν περίπου έναν αιώνα. Το πρόβλημα έγινε γενικότερου ενδιαφέροντος μετά το δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο και όλες οι προοπτικές δείχνουν ότι τα επόμενα χρόνια θα αποτελεί μια μεγάλη περιβαλλοντική ανησυχία, καθώς η χρήση ηλεκτρονικών συσκευών διευρύνεται συνεχώς σε κάθε τομέα της ζωής μας.

Η ιδέα της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας αναπτύχθηκε με σκοπό να βρεθούν τρόποι αντιμετώπισης και χειρισμού των σύνθετων συστημάτων και να βοηθηθεί η ανάπτυξη τους.

Σύμφωνα με το IEEE [1]

*Ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα (EMC)* είναι η ικανότητα μιας διάταξης μιας συσκευής ή ενός συστήματος, να λειτουργεί ικανοποιητικά στο ηλεκτρομαγνητικό της/του περιβάλλον χωρίς να εισάγει μη αντιμετωπίσιμες ηλεκτρομαγνητικές διαταραχές σε οτιδήποτε σε αυτό το περιβάλλον.

Είναι χρήσιμο να δοθούν στο σημείο αυτό οι ορισμοί των όρων που συναντώνται στην ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα:

*Ηλεκτρομαγνητική επιδεκτικότητα (Electromagnetic susceptibility)* είναι η αδυναμία μιας διάταξης ή ενός συστήματος να λειτουργεί χωρίς αλλοίωση της ποιότητας της/του κάτω από την παρουσία μιας ηλεκτρομαγνητικής διαταραχής. Δηλαδή επιδεκτικότητα είναι η έλλειψη ατρωσίας.

*Ατρωσία (Immunity level)* σε μια διαταραχή είναι η ικανότητα μιας διάταξης συσκευής ή ενός συστήματος να λειτουργεί χωρίς αλλοίωση της ποιότητάς της/του με την παρουσία μιας ηλεκτρικής διαταραχής.

*Ηλεκτρομαγνητική Στάθμη Συμβατότητας (Electromagnetic Compatibility Level):* Η καθορισμένη μέγιστη στάθμη ηλεκτρομαγνητικής διαταραχής που αναμένεται να εφαρμοστεί σε μια διάταξη, συσκευή ή σύστημα που λειτουργεί σε συγκεκριμένες συνθήκες.

*Στάθμη Ατρωσίας (Immunity level)* είναι η μέγιστη στάθμη μίας δεδομένης ηλεκτρομαγνητικής διαταραχής που συμβαίνει σε μία συγκεκριμένη διάταξη, συσκευή ή σύστημα για την οποία αυτό παραμένει ικανό να λειτουργήσει στον απαιτούμενο βαθμό απόδοσης.

*Όριο Ατρωσίας (Immunity Limit)* είναι η καθορισμένη στάθμη ατρωσίας.

*Περιθώριο Ατρωσίας (Immunity Margin)* είναι η διαφορά μεταξύ του ορίου ατρωσίας μίας διάταξης συσκευής ή συστήματος και της στάθμης ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας.

*Περιθώριο Ηλεκτρομαγνητικής Συμβατότητας (Electromagnetic Compatibility Margin):* Είναι ο λόγος της στάθμης ατρωσίας μίας διάταξης συσκευής ή συστήματος ως προς μία στάθμη διαταραχής αναφοράς.

*Ηλεκτρομαγνητική διαταραχή (Electromagnetic Interference):* Είναι κάθε ηλεκτρομαγνητικό φαινόμενο που μπορεί να προκαλέσει πτώση της απόδοσης μίας διάταξης, συσκευής ή συστήματος ή να επιδράσει δυσμενώς σε αδρανή ή ζωνική ύλη. Μια ηλεκτρομαγνητική διαταραχή μπορεί να είναι θόρυβος ηλεκτρομαγνητικής προέλευσης, ένα ανεπιθύμητο σήμα ή μία μεταβολή ίδιου του μέσου διάδοσης.

Πολλά ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα μεταβάλλονται με τη συχνότητα, αλλά οι προσεγγίσεις που χρησιμοποιούνται στους υπολογισμούς για σχεδιαστικούς σκοπούς εξαρτώνται από τις φυσικές διαστάσεις του συστήματος σε σχέση με τα μήκη κύματος των βασικών πεδίων που υπάρχουν. Αυτό σημαίνει ότι όταν αντιμετωπίσει κανείς ένα πρόβλημα ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας, είναι σημαντικό να έχει στο νου του ότι θα υπάρχει πιθανόν μία περιοχή συχνοτήτων για την οποία τα προβλήματα θα είναι πιο σοβαρά και σε αυτή την περίπτωση, θα υπάρχει επίσης μία αντίστοιχη κλίμακα αποστάσεων μέσα στην οποία θα γίνονται διαφορετικές προσεγγίσεις για την εκτέλεση των υπολογισμών. Συνεπώς λοιπόν η συχνότητα και το μέγεθος παίζουν σημαντικούς ρόλους.

## 1.2 Η ηλεκτροστατική φόρτιση (Electrostatic Charge)

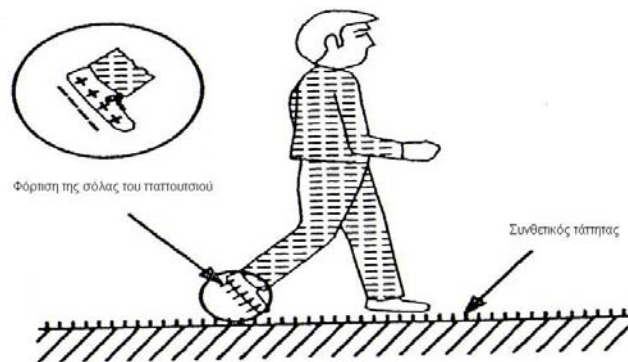
Η ηλεκτροστατική φόρτιση δημιουργείται με δύο τρόπους. Ο πρώτος είναι όταν κατά την κίνηση ενός υλικού σε σχέση με κάποιο άλλο ενώ βρίσκονται σε επαφή (π.χ. ένα αέριο που κινείται ως προς ένα στερεό ή ένα στερεό σε επαφή με ένα άλλο στερεό) συμβαίνει ανταλλαγή ηλεκτρονίων με αποτέλεσμα τη φόρτιση των δύο υλικών με αντίθετα φορτία [1], [2]. Ο δεύτερος είναι η φόρτιση εξ επαγωγής.

### 1.2.1 Τριβοηλεκτρικό φαινόμενο

Γενικά όταν δύο υλικά έρθουν σε επαφή και στη συνέχεια αποχωριστούν, θα υπάρξει μία ροή ηλεκτρονίων από το ένα υλικό στο άλλο. Το υλικό που δίνει ηλεκτρόνια φορτίζεται θετικά, ενώ το υλικό που δέχεται ηλεκτρόνια γίνεται φορτίζεται αρνητικά. Τέτοιες φορτίσεις μπορούν να οδηγήσουν στη δημιουργία μεγάλων δυναμικών στην περιοχή των 10-25 kV, με αποθηκευόμενες ενέργειες μερικών mJ. Η εκφόρτιση αυτής της ενέργειας παράγει ρεύμα η κυματομορφή του οποίου παρουσιάζει απότομες διακυμάνσεις και μπορεί να προκαλέσει ηλεκτροπληξία στους ανθρώπους και να βλάψει ηλεκτρικές συσκευές.

Ο όρος τριβοηλεκτρισμός αναφέρεται στη φόρτιση που εμφανίζεται σαν αποτέλεσμα επαφής και τριβής των υλικών. Στο Σχήμα 1.1 φαίνεται η διαδικασία φόρτισης ενός ανθρώπου κατά την κίνηση του πάνω σε συνθετικό τάπητα.

Η τριβοηλεκτρική σειρά γενικά δεν προλέγει τη σωστή πολικότητα της φόρτισης που παρατηρείται σε κάθε περίπτωση. Το αν ένα υλικό φορτιστεί θετικά ή αρνητικά εξαρτάται από τη φύση του υλικού. Αυτή η ιδιότητα συνοψίζεται στην τριβοηλεκτρική σειρά του Πίνακα 1.1 που ακολουθεί όπου τα υλικά κατατάσσονται ανάλογα με το τι φόρτιση αποκτούν (θετική ή αρνητική).



Σχήμα 1.1 : Διαδικασία φόρτισης ενός ανθρώπου εξαιτίας της τριβής με το δάπεδο

Η φόρτιση εξ επαφής είναι ο πιο κοινός τρόπος εμφάνισης στατικού φορτίου. Άλλοι τρόποι, όπως μία δέσμη φορτισμένων ιόντων, spray charging, φωτοηλεκτρική φόρτιση και φόρτιση corona είναι επίσης δυναμικές πηγές στατικών φορτίσεων. Αυτές οι φορτίσεις παραμένουν στάσιμες (στατικές) σε ένα αντικείμενο για πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα. Η απότομη μεταφορά αυτού του φορτίου από το ένα σώμα στο άλλο όταν πρόκειται για αντίθετα φορτισμένα σώματα και όταν αυτά βρεθούν σε πολύ κοντινή απόσταση λέγεται ηλεκτροστατική εκφόρτιση. Παράγοντες που επηρεάζουν τη φόρτιση και την εκφόρτιση των υλικών φαίνονται στον Πίνακα 1.2.

Η σχετική θέση του υλικού στην τριβηλεκτρική σειρά είναι μόνο ένας παράγοντας στη διαδικασία δημιουργίας της φόρτισης. Δυο υλικά τα οποία είναι σε πολύ κοντινή απόσταση μπορούν να δημιουργήσουν μία ευρεία στατική φόρτιση.

Η ηλεκτροστατική εκφόρτιση εξαρτάται από τις συνθήκες περιβάλλοντος και κυρίως από την υγρασία. Όσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό υγρασίας τόσο πιο συχνές είναι οι ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις, αλλά πιο ήπιες μορφής. Αντίθετα όταν υπάρχει αυξημένη ξηρασία η συχνότητα των εκφορτίσεων είναι μικρότερη, αλλά οι εκφορτίσεις είναι πιο έντονες (μεγάλο μέγιστο ρεύμα εκφόρτισης – μεγάλος χρόνος ανόδου). Επιβλαβείς τάσεις μπορεί ακόμα να δημιουργηθούν ακόμα και 55% σχετικής υγρασίας ή και περισσότερο.

Μερικά σοβαρά προβλήματα που έχουν προκληθεί τα τελευταία χρόνια από ηλεκτροστατική εκφόρτιση είναι:

- Εκρήξεις σε υπέρ-δεξαμενόπλοια κατά τη διάρκεια καθαρισμού των δεξαμενών τους.
- Ζημιές και καταστροφές μικροκυκλωμάτων κατά τη διάρκεια της διακίνησής τους.
- Εκρήξεις κατά τη διάρκεια τροφοδοσίας με καύσιμα των αεροσκαφών.
- Βλάβες στα ηλεκτρονικά συστήματα αυτοκινήτων.

Ενδεικτικές ηλεκτροστατικές τάσεις που παράγονται από διαφορετικά γεγονότα φαίνονται στον Πίνακα 1.3. Γενικά είναι καλύτερο να συγκρίνουμε τους μηχανισμούς φόρτισης από το επίπεδο της τάσης που δημιουργούν.

ΠΟΛΙΚΟΤΗΤΑ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΛΟΓΩ ΤΡΙΒΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΑ ΥΛΙΚΑ	
ΥΛΙΚΑ ΠΟΥ ΑΠΟΚΤΟΥΝ ΘΕΤΙΚΗ ΠΟΛΙΚΟΤΗΤΑ	ΥΛΙΚΑ ΠΟΥ ΑΠΟΚΤΟΥΝ ΑΡΝΗΤΙΚΗ ΠΟΛΙΚΟΤΗΤΑ
Αέρας Ανθρώπινο δέρμα Γυαλί Ανθρώπινα μαλλιά Νάilon Μαλλί Γούνα Μόλυβδος Μετάξι Αλουμίνιο Χαρτί Πολυουρεθάνη Βαμβάκι Ξύλο Ατσάλι	Κερί γυαλίσματος Σκληρό λάστιχο Κόλλα συγκόλλησης Νικέλιο , Χαλκός , Ασήμι Ανοξειδωτο ατσάλι Συνθετικό λάστιχο Ακρυλικό Αφρός πολυουρεθάνης Πολυεστέρας Πολυαιθυλαίνιο PVC TEFLON Λάστιχο σιλικόνης

Πίνακας 1.1 : Τριβοηλεκτρική σειρά

Συντελεστές παραγωγής της φόρτισης	Συντελεστές εκφόρτισης
Σχετική θέση στην τριβοηλεκτρική σειρά Επιφάνεια επαφής Συντελεστής τριβής μεταξύ των υλικών Βαθμός διαχωρισμού	Αγωγιμότητα των υλικών Σχετική υγρασία Υγρασία στις επιφάνειες των υλικών Βαθμός αναδιάταξης στη δομή του υλικού

Πίνακας 1.2 : Παράγοντες που επηρεάζουν την ένταση μιας φόρτισης

ΕΝΕΡΓΕΙΑ	ΣΧΕΤΙΚΗ ΥΓΡΑΣΙΑ		
	10%	40%	55%
Περπατώντας πάνω σε χαλί	35	15	7,5
Περπατώντας πάνω σε δάπεδο βινυλίου	12	5	3
Κινήσεις ενός εργαζομένου στο γραφείο	6	0,8	0,4

Πίνακας 1.3: Τυπικές ηλεκτροστατικές τάσεις (kV)



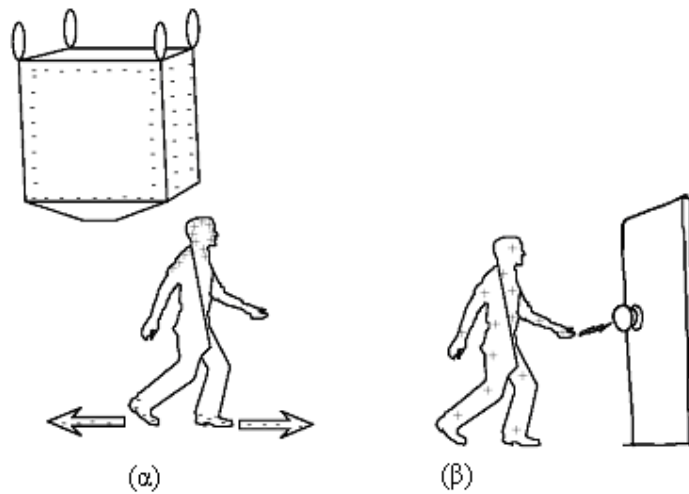
Πολλές προδιαγραφές ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας [3], [4] περιλαμβάνουν δοκιμές σε ηλεκτροστατική εκφόρτιση. Το μέγεθος ενός παλμού ηλεκτροστατικής εκφόρτισης είναι στατικό μέγεθος από τη φύση του και έτσι συνήθως καθορίζονται τυπικοί παλμοί και ρεύματα για τις δοκιμές.

Η ηλεκτροστατική φόρτιση είναι ένας πολύ γνωστός κίνδυνος για τις ηλεκτρονικές διατάξεις η οποία μπορεί να διαταράξει ή και να καταστρέψει ακόμη, ηλεκτρονικά εξαρτήματα και συστήματα τα οποία βρίσκονται κοντά σε αυτή. Αυτό μπορεί να συμβεί από άμεσες εκφορτίσεις πάνω στον ηλεκτρονικό εξοπλισμό, είτε από τα παροδικά ηλεκτρομαγνητικά πεδία που δημιουργούνται κατά τη διάρκεια ενός τέτοιου γεγονότος.

### 1.2.2 Ηλεκτροστατική φόρτιση εξ επαγωγής

Μερικές φορές η φόρτιση ενός αντικειμένου μπορεί να μη γίνει με το τριβοηλεκτρικό φαινόμενο [5], αλλά μπορεί να γίνει εξ επαγωγής. Συγκεκριμένα όταν ένα αντικείμενο εκτίθεται σε ένα ηλεκτρικό πεδίο (όπως για παράδειγμα όταν βρίσκεται δίπλα σε ένα φορτισμένο σώμα) τα αντίθετα φορτία μέσα στο υλικό θα τείνουν να χωριστούν, κατευθυνόμενα είτε προς αυτό είτε από αυτό. Οποιοδήποτε πλεονάζον φορτίο και της ίδιας πολικότητας με το γειτνιάζον φορτισμένο σώμα θα διαρρεύσει ανάλογα με την αγωγιμότητα του υλικού και της αγώγιμης σύνδεσης. Έτσι, το αντικείμενο θα αποκτήσει μια περίσσεια φορτίου αντίθετης πολικότητας από αυτή που έχει το γειτνιάζον φορτισμένο σώμα.

Για να γίνει αυτό πιο κατανοητό ακολουθεί το Σχήμα 1.2 στο οποίο φαίνεται ένας άνθρωπος (πολύ καλός αγωγός) δίπλα σε μια μεγάλη δεξαμενή η οποία περιέχει ένα μεγάλο φορτίο αρνητικής πολικότητας. Τα αρνητικά με τα θετικά φορτία διαχωρίζονται στο ανθρώπινο σώμα μέσω των υποδημάτων και του δαπέδου. Τελικά το ανθρώπινο σώμα φορτίζεται θετικά αντίθετα από το γειτνιάζον αντικείμενο. Επομένως όταν ο άνθρωπος πλησιάσει με το θετικό φορτίο που έχει αποκτήσει την πόρτα και ακουμπήσει το μεταλλικό πόμολο θα δημιουργηθεί μια ηλεκτροστατική εκφόρτιση όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.2β.



Σχήμα 1.2: Εποπτική παρουσίαση της φόρτισης εξ επαγωγής

### 1.3 Η ηλεκτροστατική εκφόρτιση σε ηλεκτροτεχνικό εξοπλισμό και τα μέτρα προστασίας που μπορούν να ληφθούν

#### 1.3.1 Ορισμοί ANSI

*Πραγματικά Γεγονότα Ηλεκτροστατικής Εκφόρτισης (Actual ESD Events)* είναι μη προερχόμενες από γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις που προκύπτουν στον περιβάλλοντα χώρο του ηλεκτρονικού εξοπλισμού.

*Μέθοδος Εκφόρτισης στον Αέρα (Air Discharge Method)* είναι μία μέθοδος ελέγχου ηλεκτροστατικής εκφόρτισης κατά την οποία το φορτισμένο ηλεκτρόδιο της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων πλησιάζει τον υπό δοκιμή εξοπλισμό (EUT) ή το επίπεδο ζεύξης δίχως να έχει σημασία η αγωγιμότητα του δέκτη ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Η εκφόρτιση παρουσιάζεται με τη μορφή ηλεκτρικού τόξου.

*Ρεύμα Εκφόρτισης (Charging Current)* είναι το μέγιστο συνεχές ρεύμα, σε οποιαδήποτε τάση φόρτισης, το οποίο μπορεί να διαρρέει την άκρη του ηλεκτροδίου εκφόρτισης της γεννήτριας.

*Μέθοδος Εκφόρτισης Εξ Επαφής (Contact Discharge Method)* είναι μία μέθοδος ελέγχου ηλεκτροστατικής εκφόρτισης κατά την οποία το ηλεκτρόδιο της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων έρχεται σε επαφή με μία αγωγή επιφάνεια του υπό δοκιμή εξοπλισμού (EUT) ή του επιπέδου ζεύξης προγενέστερα της εκφορτίσεως. Η

εκφόρτιση πραγματοποιείται μέσω ενός διακόπτη στο εσωτερικό της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων.

*Ελεγχόμενο Περιβάλλον Ηλεκτροστατικών Εκφορτίσεων (Controlled ESD Environment)* είναι το περιβάλλον στο οποίο επιχειρείται η διατήρηση των επιπέδων φόρτισης στους ανθρώπους και στα αντικείμενα σε ένα ορισμένο επίπεδο. Τούτο επιτυγχάνεται μέσω ελέγχων υγρασίας, ιονισμού του αέρα, χρήσης υψηλής αντίστασης μονοπατιών εκφόρτισης για τους ανθρώπους κλπ.

*Επίπεδο Ζεύξης (Coupling Plane)* είναι μία μεταλλική πλάκα στην οποία εφαρμόζονται εκφορτίσεις με σκοπό τη δημιουργία ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων σε γειτονικά αντικείμενα (καθέτως ή οριζοντίως).

*Άμεση Δοκιμή Ηλεκτροστατικής Εκφόρτισης (Direct ESD Test)* είναι έλεγχος κατά τον οποίο εφαρμόζεται ηλεκτροστατική εκφόρτιση άμεσα στην επιφάνεια ή στην κατασκευή του υπό δοκιμή εξοπλισμού (EUT).

*Έμμεση Δοκιμή Ηλεκτροστατικής Εκφόρτισης (Indirect ESD Test)* είναι έλεγχος κατά τον οποίο εφαρμόζεται ηλεκτροστατική εκφόρτιση σε ένα επίπεδο ζεύξης στη γειτνιαζούσα περιοχή του υπό δοκιμή εξοπλισμού (EUT).

*Ηλεκτροστατική Εκφόρτιση (ESD)* είναι η ακαριαία μεταφορά φορτίου μεταξύ σωμάτων διαφορετικής ηλεκτροστατικής ισχύος.

*Συμβάν Ηλεκτροστατικής Εκφόρτισης (ESD event)* προκύπτει όταν λαμβάνει χώρα μοναδική ηλεκτροστατική εκφόρτιση.

*Δέκτης Ηλεκτροστατικής Εκφόρτισης (ESD receptor)* είναι η επιφάνεια (ή ο στόχος) του αντικειμένου το οποίο υποβάλλεται σε μοναδική ηλεκτροστατική εκφόρτιση.

*Απόκριση στην Ηλεκτροστατική Εκφόρτιση (ESD response)* είναι η αντίδραση του υπό δοκιμή εξοπλισμού (EUT) στην ηλεκτροστατική εκφόρτιση.

*Γεννήτρια Ηλεκτροστατικών Εκφορτίσεων (ESD Simulator)* είναι μία συσκευή ελέγχου η οποία προσομοιώνει μία ηλεκτροστατική εκφόρτιση.

*Τάση Δοκιμής Ηλεκτροστατικής Εκφόρτισης (ESD Test Voltage)* είναι το πλάτος (εκφραζόμενο συνήθως σε kV) της αρχικής ηλεκτροστατικής τάσης η οποία υφίσταται πριν την εκφόρτιση.

*EUT* είναι ο υπό δοκιμή εξοπλισμός.

*Αποτυχία (Failure)* είναι η ανικανότητα ενός προϊόντος να ικανοποιήσει τις προδιαγραφές του.

*Γειωμένο Επίπεδο Αναφοράς (Ground Reference Plane (GRP))* είναι μια επίπεδη αγωγίμη επιφάνεια της οποίας η ισχύς χρησιμοποιείται ως κοινή αναφορά. Όπου εφαρμόζεται, η τάση λειτουργίας του υπό δοκιμή εξοπλισμού (EUT) και η γείωση του χειριστή θα πρέπει να ανάγονται στο γειωμένο επίπεδο αναφοράς.

*Ηλεκτροστατική Εκφόρτιση Χεριού-Μετάλλου (Hand/Metal ESD)* είναι ηλεκτροστατική εκφόρτιση προερχόμενη από το ανθρώπινο χέρι η οποία προκύπτει με τη μεσολάβηση ενός μεταλλικού αντικειμένου όπως για παράδειγμα ένα δαχτυλίδι, ένα εργαλείο, ένα κλειδί κλπ.

*Ηλεκτροστατική Εκφόρτιση Ανθρώπου-Επαφής (Human/Touch ESD)* είναι ηλεκτροστατική εκφόρτιση προερχόμενη απ' ευθείας από το ανθρώπινο άγγιγμα η οποία προκύπτει χωρίς με τη μεσολάβηση μεταλλικού αντικειμένου στο μονοπάτι της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.

*HCP* είναι το οριζόντιο επίπεδο ζεύξης.

*VCP* είναι το κατακόρυφο επίπεδο ζεύξης.

*Χρόνος Κρατήματος (Holding Time)* είναι το χρονικό διάστημα κατά το οποίο η ελάττωση της τάσης δοκιμής λόγω απωλειών, προγενέστερα της εκφόρτισης, μετρούμενη με όργανο του οποίου η συνεχής αντίσταση είναι μεγαλύτερη των  $10^{16}\Omega$  και η χωρητικότητα μικρότερη των 10 pF, δεν υπερβαίνει το 10%.

*Εισβολέας (Intruder)* είναι ένα εν κινήσει σώμα κατά τη διάρκεια της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης. Ο εισβολέας έχει συνήθως, αλλά όχι απαραίτητα, το ίδιο φορτίο με τον περίγυρό του ενώ η ισχύς του είναι διαφορετική από του δέκτη.

*Προσομοιωμένη Ηλεκτροστατική Εκφόρτιση (Simulated ESD)* είναι η προερχόμενη από τη γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων ηλεκτροστατική εκφόρτιση.

*Ταχύτητα Προσέγγισης Γεννήτριας (Simulator Approach Speed)* είναι ο ρυθμός με τον οποίο η γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων για εκφορτίσεις στον αέρα, πλησιάζει τον υπό δοκιμή εξοπλισμό (EUT) ή το επίπεδο ζεύξης.

*Επιτραπέζια Δοκιμή Ηλεκτροστατικής Εκφόρτισης (Table ESD Test)* είναι μία έμμεση δοκιμή στην οποία εφαρμόζεται ηλεκτροστατική εκφόρτιση σε οριζόντιο επίπεδο ζεύξης.

*Μη Ελεγχόμενο Περιβάλλον Ηλεκτροστατικής Εκφόρτισης (Uncontrolled ESD Environment)* είναι το περιβάλλον ηλεκτροστατικής εκφόρτισης όπου δεν καταβάλλεται καμία προσπάθεια διατήρησης των επιπέδων φόρτισης σε ανθρώπους και αντικείμενα κάτω από ένα συγκεκριμένο επίπεδο.

*Βαθμός ανεπιθύμητων αποκρίσεων (Undesirable Response Rate)* είναι το ποσοστό ανεπιθύμητων αποκρίσεων ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων του υπό δοκιμή εξοπλισμού (EUT) όταν αυτός υποβάλλεται σε συγκεκριμένο αριθμό συμβάντων ηλεκτροστατικής εκφόρτισης.

*Ηλεκτροστατική Εκφόρτιση σε Έπιπλα (Furniture ESD)* είναι μία ηλεκτροστατική εκφόρτιση στην οποία ο εισβολέας είναι ένα άψυχο αντικείμενο όπως μία καρέκλα για παράδειγμα, με το οποίο άνθρωπος είτε είναι είτε δεν είναι σε επαφή.

### 1.3.2 Οι επιπτώσεις σε ηλεκτροτεχνικό εξοπλισμό

Όπως έχει προαναφερθεί η ηλεκτροστατική εκφόρτιση παρατηρείται όταν η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου παρουσιάσει υψηλή τιμή, η οποία μπορεί να προκαλέσει καταπόνηση στη διηλεκτρική αντοχή των ηλεκτρονικών στοιχείων συσκευών με τελικό αποτέλεσμα την καταστροφή τους [2]. Κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης τα ακόλουθα φαινόμενα μπορεί να λάβουν χώρα:

- Δευτερεύον ηλεκτρικό τόξο εντός του εξοπλισμού, το οποίο μπορεί να προκαλέσει με τη σειρά του την εμφάνιση νέων φαινομένων.
- Διάχυση υψηλών ηλεκτρικών ρευμάτων εντός των κυκλωμάτων. Η ροή ενός υψηλού ρεύματος μπορεί να διαταράξει τις συνθήκες λειτουργίας των κυκλωμάτων, οδηγώντας σε αλλαγές: στο κέρδος (gain) του κυκλώματος, στο εύρος ζώνης (bandwidth), αλλοιώσεις στα δημιουργούμενα σήματα και στη λογική των ψηφιακών κυκλωμάτων. Τα αποτελέσματα μπορεί να διαφέρουν από προσωρινή παρεμβολή έως καταστροφή των εξαρτημάτων.
- Ηλεκτρική επαγωγή εξαιτίας της χωρητικής σύζευξης σε μέρη του εξοπλισμού τα οποία αναπτύσσουν υψηλές τάσεις εξ επαγωγής. Τα αποτελέσματά τους είναι μια προσωρινή κακή λειτουργία των κυκλωμάτων.
- Μαγνητική επαγωγή εξαιτίας της επαγωγικής σύζευξης από τις διαδρομές που ακολουθεί το εκχυόμενο ηλεκτρικό ρεύμα.

### 1.3.3 Μέτρα προστασίας του ηλεκτροτεχνικού εξοπλισμού

Η προστασία από ενδεχόμενες ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις μπορεί να γίνει τόσο με προληπτικά μέτρα, όσο και με μέσα που θα ελαχιστοποιήσουν τα δυσμενή αποτελέσματά τους όταν οι εκφορτίσεις αυτές εμφανιστούν [2]. Τα προληπτικά μέτρα περιλαμβάνουν:

- Προστασία από την εμφάνιση του τριβοηλεκτρικού φαινομένου. Το φαινόμενο αυτό λαμβάνει χώρα από την τριβή δύο μονωτικών υλικών ή από

την τριβή ενός μονωτικού και ενός αγωγού. Άρα για να αποτραπεί η εμφάνιση του ηλεκτροστατικού φορτίου η θωράκιση μίας ή και των δύο επιφανειών που έρχονται σε επαφή είναι επιβεβλημένη, με ένα αγωγίμο στρώμα.

- Αποτροπή της ανάπτυξης της τάσης φόρτισης. Αυτό σημαίνει ότι το αναπτυσσόμενο φορτίο στην επιφάνεια του υλικού θα πρέπει να οδηγηθεί στο έδαφος. Σε αυτό μπορούν να βοηθήσουν αντιστατικά υλικά [6] με ιδιαίτερα γνωστές τις αντιστατικές πλαστικές σακούλες. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι οι Fowler, Klein και Fromm [7] ανέπτυξαν κάποιες προτάσεις σχετικά με τη σχεδίαση των δαπέδων, προκειμένου να αποφεύγεται εξαιτίας τους η δημιουργία ηλεκτροστατικού φορτίου. Τα συμπεράσματά τους συνοψίζονται στο ότι τα δάπεδα θα πρέπει να έχουν αντίσταση ως προς γη μικρότερη των  $10^7 \Omega$  και πως θα πρέπει να έχουν αρκετά καλές μονωτικές ιδιότητες.

Η προστασία των συσκευών από τις ηλεκτροστατικές φορτίσεις όταν αυτές έχουν πλέον συμβεί μπορεί να γίνει με την λήψη των ακόλουθων μέτρων:

- Πλήρης ή μερική μόνωση του εξοπλισμού, της οποίας σκοπός είναι η αποτροπή δευτερευόντων εκφορτίσεων.
- Θωράκιση ή γείωση των συσκευών, οι οποίες θα εξασφαλίζουν μια εναλλακτική διαδρομή της ροής του ηλεκτρικού ρεύματος.
- Θωράκιση κυκλωμάτων εναντίον των πεδίων εξ επαγωγής.
- Εγκατάσταση των συσκευών προστασίας στον εξοπλισμό.

Όταν τα ηλεκτρικά κυκλώματα τοποθετούνται σε μονωμένο πλαίσιο (case) τότε μπορεί να αποτραπούν ενδεχόμενες δευτερεύουσες φορτίσεις. Για αυτό προκειμένου να είναι αποτελεσματικές πρέπει τα πλαίσια να μην έχουν οπές, αρμούς ή άλλα ανοίγματα μέσω των οποίων οι κύριες εκφορτίσεις μπορεί να λάβουν χώρα, είτε άμεσα στα εσωτερικά κυκλώματα ή έμμεσα σε μια προεξοχή, διακόπτη ή μπουτόν, τα οποία διαπερνούν το πλαίσιο.

Το μέγιστο δυναμικό το οποίο μπορεί να αναπτύξει ένα ανθρώπινο σώμα είναι 25 kV. Εάν ένα άτομο πλησιάσει κάποιο μέρος του σώματός του, το οποίο συνηθέστερα είναι το δάκτυλό του, πλησιέστερα από 1 cm, μακριά από το κύκλωμα, τότε δεν θα συμβεί η ηλεκτροστατική εκφόρτιση εφόσον η διάσπαση του αέρα γίνεται στα 30 kV. Ο πιο αποτελεσματικός τρόπος προστασίας κυκλωμάτων από ηλεκτροστατική

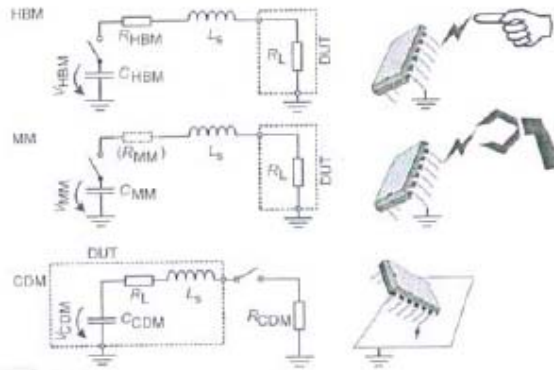
εκφόρτιση είναι η τοποθέτησή τους σε ένα αγώγιμο πλαίσιο, το οποίο δεν έχει οπές, αρμούς ή άλλα ανοίγματα στα τοιχώματά του.

## 1.4 Μοντέλα για την ηλεκτροστατική εκφόρτιση

### 1.4.1 Γενικά

Προκειμένου να προσομοιωθούν οι ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις έχουν προταθεί διάφορα μοντέλα, ώστε μέσω αυτών να μπορέσουν να εκτιμήσουν την επίδραση που μπορεί να έχουν οι εκφορτίσεις στην πραγματικότητα. Με αυτά έχουν ασχοληθεί εκτενέστατα πολλοί ερευνητές [2], [6], [8]. Τα τρία επικρατέστερα μοντέλα είναι: το μοντέλο του ανθρώπινου σώματος (Human Body Model – HBM), το μοντέλο της μηχανής (Machine Model – MM) και το μοντέλο της φορτισμένης συσκευής (Charged Device Model – CDM).

Απλές κυκλωματικές αναπαραστάσεις των κυκλωμάτων αυτών φαίνονται στο Σχήμα 1.3. Και τα τρία μοντέλα μπορούν να περιγραφούν από της δεύτερης τάξης διαφορικές εξισώσεις οι οποίες ισχύουν στα RLC κυκλώματα.



Σχήμα 1.3 : Παραδείγματα εκφορτίσεων σύμφωνα με τα τρία μοντέλα (HBM, MM, CDM) και η κυκλωματική τους αναπαράσταση με κυκλώματα RLC [6].

Θεωρώντας  $R_{ESD}$  τη συνολική ωμική αντίσταση σε κάθε κύκλωμα, δηλαδή το άθροισμα της ωμικής αντίστασης σε κάθε κύκλωμα και της ωμικής αντίστασης  $R_L$  της υπό εξέταση συσκευής (Device Under Test, DUT),  $C_{ESD}$  την χωρητικότητα ο οποίος αρχικά είναι φορτισμένος σε τάση  $V_{ESD}$  και  $L_S$  την αυτεπαγωγή στη διαδρομή εκφόρτισης η διαφορική εξίσωση 2ης τάξης που ισχύει είναι:

$$L_S \frac{d^2 i}{dt} + R_{ESD} \frac{di}{dt} + \frac{1}{C_{ESD}} i = 0 \quad (1.1)$$

της οποίας η αναλυτική λύση είναι:

$$i_{ESD}(t) = V_{ESD} C_{ESD} \frac{\omega_0^2}{\sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2}} e^{-\alpha t} \sinh(\sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2} t), \text{ για } \alpha > \omega_0 \quad (1.2)$$

$$i_{ESD}(t) = V_{ESD} C_{ESD} \frac{\omega_0^2}{\sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2}} e^{-\alpha t} \sinh(\sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2} t), \text{ για } \alpha < \omega_0 \quad (1.3)$$

όπου  $\alpha = \frac{R_{ESD}}{2L_S}$  ο συντελεστής απόσβεσης και  $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_S C_{ESD}}}$  η συχνότητα ταλάντωσης.

Παραδείγματα για τις τυπικές παραμέτρους και των τριών μοντέλων φαίνονται στον Πίνακα 1.4.

Παράμετρος	HBM	MM	CDM
$V_{ESD}$	4000 V	200 V	500 V
$R_{HBM} / R_{MM} / R_{CDM}$	1,5 kΩ	5 Ω	10 Ω
$C_{ESD}$	100 pF	200 pF	10 pF
$L_S$	500 nH	750 nH	750 nH
$R_L$	10Ω		
$I_{ESD}$	2,6 A	2,8 A	10,4 A
$t_{rise} (10\%/90\%)$	≈ 7 ns	≈ 11 ns	≈ 0,3 ns
$A$	$1,5 \times 10^8 s^{-1}$	$0,1 \times 10^8 s^{-1}$	$10 \times 10^8 s^{-1}$
$\omega_0$	$0,5 \times 10^8 s^{-1}$	$0,8 \times 10^8 s^{-1}$	$30 \times 10^8 s^{-1}$
FWHM	≈ 120 ns	≈ 26 ns	≈ 0,7ns

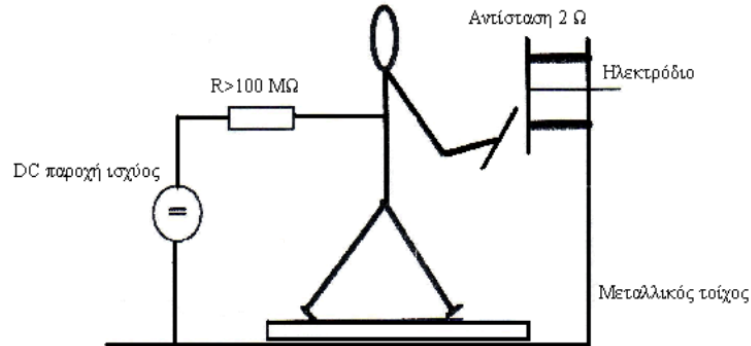
Πίνακας 1.4 : Τυπικές τιμές παραμέτρων για τα μοντέλα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης

[6]



### 1.4.2 Αξιολόγηση του Human Body Model

Από πολλές μετρήσεις που έγιναν σε διαφορετικούς ανθρώπους [9] είναι ξεκάθαρο ότι δημιουργήθηκαν πολλές διαφορετικές αποδεκτές κυματομορφές. Ο χρόνος ανόδου αυτών των κυματομορφών κυμαίνεται μεταξύ 100 ps έως 30 ns. Οι άνθρωποι νοιώθουν μια εκφόρτιση, μόνον όταν η τάση είναι περίπου 3 kV ή μεγαλύτερη.

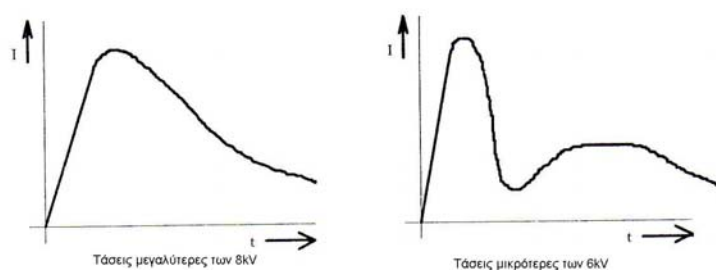


Σχήμα 1.4: Διάταξη μετρήσεων για εκφορτίσεις ανθρωπίνου σώματος

Μια ανάλυση των αποτελεσμάτων από μετρήσεις που έχουν παρθεί από διάταξη όπως αυτή του Σχήματος 1.4 δίνουν τα ακόλουθα αποτελέσματα:

- Η αντίσταση της επιδερμίδας  $R$  είναι περίπου  $150\Omega$  έως  $1000\Omega$  (χωρίς ο άνθρωπος να κρατά κάποιο μεταλλικό αντικείμενο όπως κλειδιά, μαχαίρι, βίδα, κ.τ.λ).
- Ανθρώπινη χωρητικότητα περίπου  $150\text{ pF}$ .
- Τάσεις πάνω από  $15\text{ kV}$  υπολογισμένες με το καθιερωμένο μέγεθος και τη χωρητικότητα του ανθρώπου.

Η κυματομορφή της εκφόρτισης βρέθηκε να είναι πολύ διαφορετική από άνθρωπο σε άνθρωπο και επίσης από μέτρηση σε μέτρηση. Δυο ακραία παραδείγματα φαίνονται στο Σχήμα 1.5:



Σχήμα 1.5: Διάφορες κυματομορφές εκφορτίσεων (ns)

# Κεφάλαιο 2

## Πρότυπο IEC 61000-4-2

### 2.1 Σκοπός

Το διεθνές Πρότυπο IEC 61000-4-2 [10] περιγράφει την μέθοδο και τις διαδικασίες που πρέπει να ακολουθηθούν για τη διενέργεια της δοκιμής ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων στα ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά προϊόντα με έμφαση στον οικιακό εξοπλισμό και τα όργανα μέτρησης. Το Πρότυπο ορίζει τις τυπικές κυματομορφές του εκφορτιζόμενου ρεύματος, τα επίπεδα δοκιμών, τον εξοπλισμό δοκιμών και τη διαδικασία με την οποία η δοκιμή του Προτύπου αυτού θα πρέπει να γίνεται κάθε φορά.

### 2.2 Εξοπλισμός δοκιμών

Ο απαιτούμενος εξοπλισμός [11] για την πραγματοποίηση δοκιμών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων είναι ο ακόλουθος:

- Κλωβός Faraday για τοποθέτηση του εξοπλισμού μετρήσεων.
- Γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων (ESD generators).
- Παλμογράφος με εύρος τουλάχιστον 1 GHz.
- Ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης.
- Εξασθενητής.
- Ομοαξονικό καλώδιο για υψίσυχνα σήματα.
- Βολτόμετρο συνεχούς υψηλής τάσης ( $R_i > 30 \text{ G}\Omega$ ).

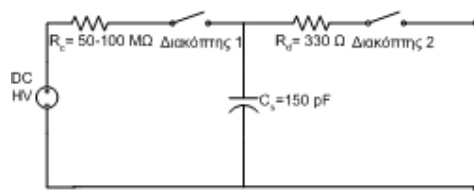
#### 2.2.1 Γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων

Το αρχικό Πρότυπο που δημιουργήθηκε για την ηλεκτροστατική εκφόρτιση ήταν το IEC 801-2 [12] το οποίο αναθεωρήθηκε και έφτασε στην τελική του μορφή σαν IEC 1000-4-2 [13] και στην Ευρωπαϊκή του έκδοση είναι γνωστό σαν EN 61000-4-2 [10]. Η γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων που περιγράφεται στο πρότυπο IEC 61000-4-2 βασίζεται στο μοντέλο του ανθρωπίνου σώματος (Human Body Model). Το κύκλωμά της όπως αυτό φαίνεται στο Σχήμα 2.1 το απαρτίζουν:

- Ο πυκνωτής ενταμίευσης ( $C_s$ ).
- Το τροφοδοτικό υψηλής τάσης.
- Η αντίσταση φόρτισης ( $R_c$ ).
- Η αντίσταση εκκένωσης ( $R_d$ ).

Ο διακόπτης εκκένωσης που είναι τυπικά ένα ρελέ διακένου.

Οι δοκιμές συμμόρφωσης απαιτούν μη συνεχόμενες εκφορτίσεις. Για διερευνητικούς λόγους μπορεί να γίνονται συνεχείς εκφορτίσεις. Γι' αυτό η γεννήτρια πρέπει να έχει την δυνατότητα συνεχών εκφορτίσεων με ρυθμό μέχρι και 20 ανά δευτερόλεπτο (20 Hz). Το Πρότυπο απαιτεί την εφαρμογή και θετικών και αρνητικών εκφορτίσεων. Συνεπώς η γεννήτρια πρέπει να διαθέτει και τις δύο πολικότητες ή να υπάρχουν δύο διαφορετικές γεννήτριες (μία για θετικές και μία για αρνητικές εκφορτίσεις). Η τάση εκκένωσης εξαρτάται από τον τύπο της εκκένωσης. Για εκφορτίσεις επαφής (contact discharge) η μέγιστη τάση δοκιμών είναι 8 kV. Για εκφορτίσεις στον αέρα (air discharge), η τάση δοκιμών φτάνει τα 15 kV. Η γεννήτρια πρέπει να παρέχει τις τιμές αυτές κατ' ελάχιστον. Το κρίσιμο σημείο στη κατασκευή της γεννήτριας παίζει το ηλεκτρόδιο και το κύκλωμα εκκένωσης προκειμένου να επιτευχθούν οι απαιτούμενες κυματομορφές εκκένωσης με χρόνο ανόδου μεταξύ 0,7 και 1 ns. Για τις εκφορτίσεις επαφής χρησιμοποιείται ηλεκτρόδιο με οξύ άκρο ενώ για τις εκφορτίσεις διακένου ηλεκτρόδιο με στρογγυλό άκρο. Στο Σχήμα 2.1 φαίνεται μια κυκλωματική αναπαράσταση της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων.



Σχήμα 2.1: Κυκλωματικό διάγραμμα της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων.

#### Τεχνικά χαρακτηριστικά:

Τάση εκκένωσης: 200 V..15 kV εκφόρτιση αέρος  
200 V..8 kV επαφής

Ηλεκτρόδια εκφορτίσεων: επαφής / τοξοειδούς Πολικότητα: Θετική/ αρνητική

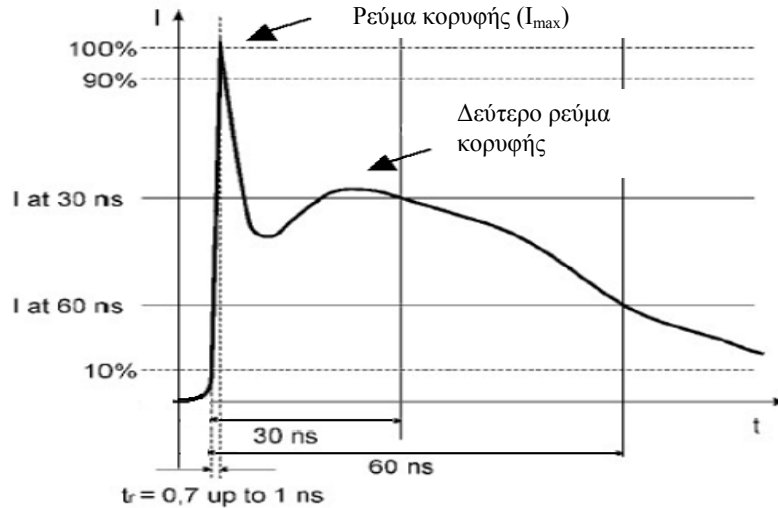
Πυκνωτής εκκένωσης  $C_s=150$  pF

Αντίσταση εκκένωσης  $R_d=330$  Ω

Αντίσταση φόρτισης  $R_c=50-100 \text{ M}\Omega$

Λειτουργία: μονές εκφορτίσεις /συνεχείς εκφορτίσεις (έως 20 Hz)

Ηλεκτρόδια εκφορτίσεων: επαφής / τοξοειδούς



Σχήμα 2.2: Η κυματομορφή του ρεύματος κατά τη διάρκεια της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης που ορίζει το Πρότυπο IEC 61000-4-2.

Ο παλμός σύμφωνα με την κυματομορφή του Σχήματος 2.2 μπορεί να χωριστεί σε δύο μέρη. Το πρώτο μέγιστο (peak) του ρεύματος το οποίο ονομάζεται και «αρχική κορυφή» (Initial Peak) προέρχεται από την εκφόρτιση του χεριού, ενώ η δεύτερη προέρχεται από την εκφόρτιση του ανθρωπίνου σώματος. Ο χρόνος ανόδου της αρχικής κορυφής προέρχεται είναι μεταξύ 0,7 ns και 1 ns, ενώ το πλάτος του εξαρτάται από την τάση φόρτισης της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων.

Ο D. Pommerenke δημοσίευσε [14] την εξίσωση της κυματομορφής του ρεύματος εκφόρτισης η οποία φαίνεται στη σχέση (2.2):

$$i(t) = \frac{i_1}{k_1} \cdot \frac{\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n}{1 + \left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_2}} + \frac{i_2}{k_2} \cdot \frac{\left(\frac{t}{\tau_3}\right)^n}{1 + \left(\frac{t}{\tau_3}\right)^n} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_4}} \quad (2.1)$$

όπου οι  $k_1$ ,  $k_2$  δίνονται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$k_1 = e^{-\frac{\tau_1}{\tau_2} \left(\frac{n\tau_2}{\tau_1}\right)^{\frac{1}{n}}} \quad (2.2)$$

$$k_2 = e^{-\frac{r_3}{r_4} \left( \frac{n r_4}{r_3} \right)^{\frac{1}{n}}} \quad (2.3)$$

Η μορφή των παραπάνω σχέσεων δεν είναι οριστική, αλλά βρίσκονται ακόμα υπό συζήτηση και ενδέχεται να οριστικοποιηθούν στην επόμενη έκδοση του Προτύπου IEC 61000-4-2.

### 2.2.2 Περιγραφή του χώρου δοκιμών

Το εύρος των διαταραχών από τις ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις είναι μεγάλο και εκτείνεται μέχρι την περιοχή VHF. Οι ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις προβλέπεται να γίνονται σε θωρακισμένο θάλαμο. Το δοκίμιο και η γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων τοποθετούνται εντός του θωρακισμένου θαλάμου μεταβατικών διαταραχών (transient immunity room). Ο βοηθητικός εξοπλισμός βρίσκεται στον θάλαμο ελέγχου (control room). Κατά την διάρκεια των δοκιμών η πόρτα του θαλάμου μεταβατικών διαταραχών είναι κλειστή.

### 2.2.3 Διάταξη δοκιμών (test set-up)

Η διάταξη δοκιμών αποτελείται από την γεννήτρια δοκιμών, το δοκίμιο (EUT) και τα βοηθητικά όργανα και εξοπλισμό που απαιτείται για την εκτέλεση άμεσων και έμμεσων ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων. Το δοκίμιο τοποθετείται και συνδέεται σύμφωνα με τις λειτουργικές απαιτήσεις. Τηρείται απόσταση 1 m κατ' ελάχιστον μεταξύ του δοκιμίου και των τοίχων του εργαστηρίου ή άλλης μεταλλικής κατασκευής. Το δοκίμιο συνδέεται με το σύστημα γείωσης σύμφωνα με τις οδηγίες και απαιτήσεις εγκατάστασης. Δεν επιτρέπεται πρόσθετη γείωση. Το καλώδιο της γείωσης (πράσινο-κίτρινο) της γεννήτριας συνδέεται στο εδαφικό επίπεδο αναφοράς. Το συνολικό μήκος του καλωδίου δεν πρέπει να ξεπερνά τα 2 m.

#### Επιτραπέζιος εξοπλισμός

Ο επιτραπέζιος εξοπλισμός τοποθετείται στο ειδικά διαμορφωμένο ξύλινο τραπέζι, ύψους 0,8 m με επικολλημένο το οριζόντιο επίπεδο σύζευξης (HCP) διαστάσεων 1,6 m x 0,8 m από χαλκό.

#### Επιδαπέδιος εξοπλισμός

Το δοκίμιο και τα καλώδια πρέπει να απομονώνονται από το εδαφικό επίπεδο αναφοράς με ένα μονωτικό στήριγμα πάχους 0,1 m. Τυχόν πόδια στήριξης του δοκιμίου παραμένουν στη θέση τους.

### 2.3 Παράμετροι ρεύματος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης

Οι παράμετροι που πρέπει να ελέγχονται είναι:

- Ρεύμα κορυφής
- Χρόνος ανόδου
- Χρόνος καθόδου παλμού
- Γραμμικότητα τάσης

Δίνεται ο κατωτέρω πίνακας σύμφωνα με την παράγραφο 6.2 του προτύπου IEC 61000-4-2:

Επίπεδο	Ένδειξη τάσης kV	Ρεύμα κορυφής ( $\pm 10\%$ ) A	Χρόνος ανόδου με διακόπτη εκκένωσης $t_r$ (ns)	Ρεύμα στα 30 ns ( $\pm 30\%$ ) A	Ρεύμα στα 60 ns ( $\pm 30\%$ ) A
1	2	7.5	0.7-1	4	2
2	4	15	0.7-1	8	4
3	6	22.5	0.7-1	12	6
4	8	30	0.7-1	16	8

Πίνακας 2.1: Επίπεδα τάσεων δοκιμών

### 2.4 Τι ορίζει το πρότυπο ANSI για τις κυματομορφές του ρεύματος εκφορτίσεως

Στο πρότυπο ANSI (American National Standard Institute) C63.16.1993 [15] οι τύποι εκκένωσης για την παραγόμενη ηλεκτροστατική εκφορτίση είναι οι ακόλουθοι:

Εκφορτίσεις από το ανθρώπινο σώμα προς μεταλλικά σώματα (hand metal).

Εκφορτίσεις μεταξύ μεταλλικών αντικειμένων (metallic furniture).

Αυτές οι δοκιμές ηλεκτροστατικής εκφόρτισης μπορούν να πραγματοποιηθούν χρησιμοποιώντας γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων για δοκιμές μέσω αέρα ή επαφής.

#### **2.4.1 Δοκιμές ESD μέσω αέρα ή επαφής**

Οι μέθοδοι προσομοίωσης ηλεκτροστατικής εκφόρτισης στον αέρα ή σε επαφή έχουν επιλεγεί ως οι πιο κατάλληλοι για τον καθορισμό των αποτελεσμάτων που δημιουργούνται κατά την ηλεκτροστατική εκφόρτιση. Παρόλα αυτά κάθε ένα από τα παραπάνω είδη ηλεκτροστατικής εκφόρτισης παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα οπότε θα πρέπει σε κάθε περίπτωση να αποφασιστεί ποιο είδος ηλεκτροστατικής εκφόρτισης θα χρησιμοποιηθεί. Έτσι:

Για δοκιμές σε μεταλλικές επιφάνειες μπορούν να χρησιμοποιηθούν και οι δυο μέθοδοι ηλεκτροστατικής εκφόρτισης που αναφέρονται παραπάνω.

Για δοκιμές σε μονωτικές επιφάνειες η επικρατούσα μέθοδος είναι η εκφόρτιση μέσω αέρα.

Όταν επιχειρούμε έμμεσα τέστ ηλεκτροστατικής εκφόρτισης χρησιμοποιώντας επίπεδα ζεύξης μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε είτε εκφορτίσεις μέσω αέρα είτε μέσω επαφής αλλά οι εκφορτίσεις επαφής προτιμούνται λόγω της ικανότητας της για επαναληπτικότητα.

#### **2.4.2 Ρεύμα ESD σύμφωνα με το πρότυπο ANSI**

Οι γεννήτριες ESD οι οποίες είναι ικανές να παράγουν τις κυματομορφές που φαίνονται στο Σχήμα 2.3 πρέπει να είναι σε θέση να ακολουθούν τις προδιαγραφές για κάθε επαναλαμβανόμενο ρυθμό εκκένωσης που είναι σύμφωνος με τα πειράματα. Το Πρότυπο ANSI ορίζει την κυματομορφή του ρεύματος για τρεις διαφορετικές περιοχές τάσης φόρτισης όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.3.

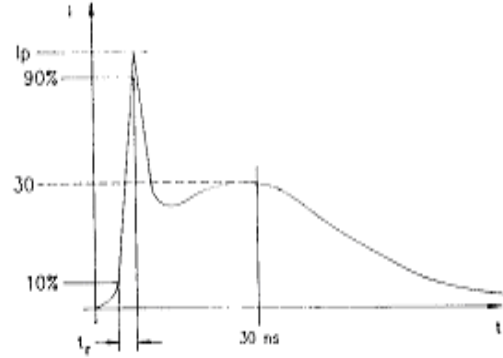
Τα χαρακτηριστικά των γεννητριών ESD σύμφωνα με το πρότυπο ANSI είναι τα ακόλουθα:

- Ρεύμα φορτίσεως ( $I_{ch}$ ):  $\leq 3.5$  mA (dc) σε κάθε τάση φόρτισης.
- Τάση εξόδου: τουλάχιστον 1-6 kV για εκφορτίσεις επαφής και 2-15 kV για εκφορτίσεις μέσω αέρα.
- Ακρίβεια στην τάση εξόδου:  $\pm 5\%$
- Πολικότητα της τάσης εξόδου: και οι δύο πολικότητες της εκφόρτισης πρέπει να χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια των ερευνητικών ελέγχων για να

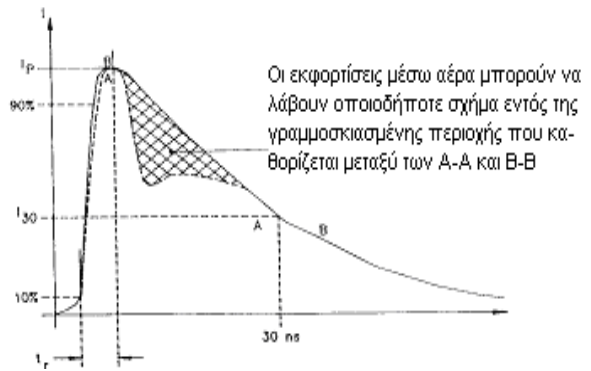
καθοριστούν τα αποτελέσματα που δημιουργούνται στα υπό εξέταση δοκίμια.

- Χρόνος κρατήματος (holding time): τουλάχιστον 5 sec.

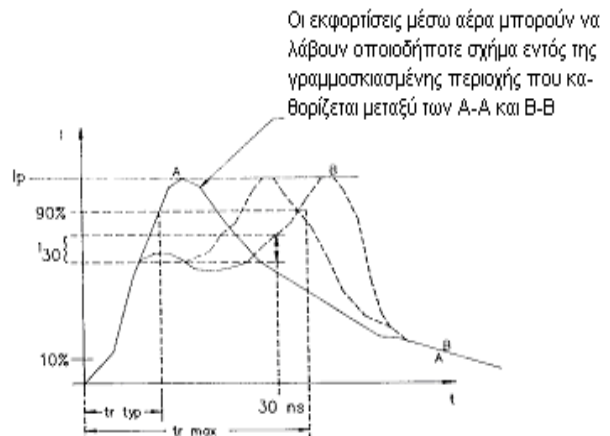
Κυματομορφή ρεύματος για εκφορτίσεις γεννητριών ESD σε τάσεις μικρότερες από 4 KV



Κυματομορφή ρεύματος για εκφορτίσεις σε τάσεις μεταξύ 4-10 KV



Κυματομορφή ρεύματος για εκφορτίσεις σε τάσεις άνω των 10 KV



Σχήμα 2.3: Κυματομορφές ρεύματος για εκφορτίσεις σε διαφορετικές τάσεις σύμφωνα με το πρότυπο ANSI.



# Κεφάλαιο 3

## Βιβλιογραφική ανασκόπηση

### 3.1 Σκοπός

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστεί η μοντελοποίηση της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης με βάση το στοιχειώδες ηλεκτρικό δίπολο και θα δοθούν οι αναλυτικές εκφράσεις τόσο για το ηλεκτρικό όσο και το μαγνητικό πεδίο. Επίσης θα παρουσιαστούν στοιχεία από μελέτες που έχουν γίνει στο παρελθόν σχετικά με το πώς μεταβάλλεται το πεδίο σε συνάρτηση με την απόσταση κατά την ηλεκτροστατική εκφόρτιση.

### 3.2 Το ηλεκτρικό δίπολο

Ο πρώτος σπινθήρας που θα υπάρξει κατά τη διάρκεια της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης παράγει μεγάλες τιμές στη μεταβολή του ρεύματος  $\frac{\partial i(t)}{\partial t}$ , όπου  $i(t)$  είναι το ρεύμα που παράγεται κατά την εκφόρτιση. Η μεταβολή του ρεύματος  $\frac{\partial i(t)}{\partial t}$  παίζει σημαντικότατο ρόλο στα παραγόμενα ηλεκτρομαγνητικά πεδία. Ο αρχικός αυτός σπινθήρας εξαρτάται επίσης από την ταχύτητα του αντικειμένου που παράγει την εκφόρτιση, που στην περίπτωσή μας είναι η γεννήτρια παραγωγής ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων. Έχουν διαπιστωθεί τα εξής σχετικά με το αρχικό στάδιο της εκφόρτισης:

- α) Όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα προσέγγισης του σώματος που θα προκαλέσει την εκφόρτιση τόσο πιο απότομες είναι οι μεταβολές των καμπυλών του ρεύματος.
- β) Υψηλότερες τάσεις εκφόρτισης απαιτούν υψηλότερες ταχύτητες προσέγγισης του στόχου, ώστε να επιτευχθούν πολύ γρήγορα φαινόμενα.

Το μοντέλο που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε για να περιγράψουμε την ηλεκτροστατική εκφόρτιση είναι το σημειακό ηλεκτρικό δίπολο [16, 17]. Το

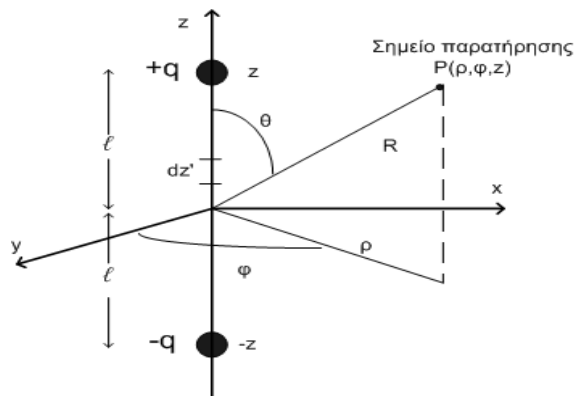
σύστημα συντεταγμένων που θα χρησιμοποιηθεί είναι οι κυλινδρικές συντεταγμένες λόγω της γεωμετρίας του προβλήματος. Το σημειακό ηλεκτρικό δίπολο τοποθετείται κατά μήκος του άξονα  $z$ , με το κέντρο του στην αρχή  $O$  του συστήματος συντεταγμένων. Τα σημειακά φορτία  $+q$ ,  $-q$  προσομοιώνουν τις συνθήκες που επικρατούν ακριβώς πριν συμβεί η εκφόρτιση, τη στιγμή  $t = 0^-$ , όταν έχουμε την κατάσταση ενός ηλεκτροστατικού δίπολου. Αμέσως με την αρχή του φαινομένου, το δίπολο εκφορτίζεται διαμέσου του αγωγίμου δρόμου μήκους  $2\ell$  που δημιουργείται ανάμεσα στα δυο φορτία. Έτσι γραμμικό ρεύμα, θεωρούμενο ως θετική κίνηση αρνητικών φορτίων (ή αρνητική θετικών φορτίων), χρονικά μεταβαλλόμενο θα αρχίσει να ρέει στον αγωγίμο δρόμο μήκους  $2\ell$ .

### 3.3 Πεδιακή ανάλυση της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης

Στην παράγραφο αυτή θα γίνει εκτενής ανάλυση του εκπεμπόμενου ηλεκτρομαγνητικού πεδίου από ηλεκτροστατική εκφόρτιση. Χρησιμοποιώντας σαν μαθηματικό εργαλείο τις εξισώσεις του Maxwell οι P.F Wilson και M.T. Ma [16], εξήγαγαν αναλυτικές εκφράσεις για το παραγόμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο.

#### 3.3.1 Αναλυτική επίλυση – Εγγύς και μακρινό πεδίο

Το σημειακό ηλεκτρικό δίπολο τοποθετείται κατά μήκος του άξονα  $z$ , με το κέντρο του στην αρχή του συστήματος συντεταγμένων (σημείο  $O$ ) όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1. Το σύστημα συντεταγμένων που χρησιμοποιείται είναι το κυλινδρικό λόγω της συμμετρίας του προβλήματος. Το φορτίο  $+q$  βρίσκεται σε ύψος  $z$ , οπότε το είδωλό του βρίσκεται στο  $-z$ . Τα χρονομεταβλητά πεδία μπορούν εύκολα να υπολογιστούν από τη θεωρία των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων [18]. Η εκφόρτιση γίνεται πάνω στο επίπεδο, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.1 που παρουσιάζεται παρακάτω:



Σχήμα 3.1: Ηλεκτρικό δίπολο εντοσκόμενο πάνω από επίπεδο

Οι αναλυτικές εξισώσεις για την ένταση του ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου [16],  $\vec{E}$  και  $\vec{H}$  αντιστοίχως είναι:

$$\vec{E} = E_\rho \cdot \vec{\alpha}_\rho + E_z \cdot \vec{\alpha}_z \quad (3.1)$$

$$E_\rho = \frac{d}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0} \cdot \frac{\rho \cdot z}{R^2} \left( \frac{3 \cdot i(z, t - \frac{R}{c})}{c \cdot R^2} + \frac{1}{c^2 R} \frac{\partial i(z, t - \frac{R}{c})}{\partial t} \right) \quad (3.2)$$

$$E_z = \frac{d}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0} \left( \left( \frac{3 \cdot z^2}{c \cdot R^4} \cdot \frac{1}{c \cdot R^2} \right) \cdot i(z, t - \frac{R}{c}) + \left( \frac{z^2}{c^2 \cdot R^3} \cdot \frac{1}{c^2 \cdot R} \right) \cdot \frac{\partial i(z, t - \frac{R}{c})}{\partial t} \right) \quad (3.3)$$

$$H_\phi(\rho, z, t) = \frac{d}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{\rho}{R} \left( \frac{i(z, t - \frac{R}{c})}{R^2} + \frac{1}{c \cdot R} \frac{\partial i(z, t - \frac{R}{c})}{\partial t} \right) \quad (3.4)$$

όπου  $R$  είναι η απόσταση του σημείου εκφόρτισης από το σημείο παρατήρησης ( $\rho$ ,  $\phi$ ,  $z$ ),  $c$  η ταχύτητα του φωτός),  $d=2\ell$  το μήκος του αγωγίμου δρόμου που δημιουργείται ανάμεσα στα δυο φορτία,  $\varepsilon_0$  η διηλεκτρική σταθερά του κενού,  $\alpha_z$ ,  $\alpha_\rho$  τα μοναδιαία διανύσματα στο σύστημα κυλινδρικών συντεταγμένων και  $\rho$  η προβολή του μήκους  $R$  πάνω στο επίπεδο  $xy$ .

### 3.4 Η μεταβολή του πεδίου σε συνάρτηση με την απόσταση κατά την ηλεκτροστατική εκφόρτιση

Ο D. Pommerenke [19] έχει ασχοληθεί με τη μεταβολή του μαγνητικού πεδίου σε συνάρτηση με την απόσταση και στηριζόμενος στη σχέση (3.4) αναφέρει πώς αυτή μπορεί να τροποποιηθεί προκειμένου να περιγραφεί καλύτερα το μαγνητικό πεδίο σε μακρινές και κοντινές αποστάσεις. Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε, η σχέση (3.4) δείχνει ότι υπάρχουν δυο βασικές περιοχές για το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο:

- Η περιοχή του εγγύς πεδίου στη οποία επικρατεί το ρεύμα  $i(z, t - \frac{R}{c})$  και

- Η περιοχή του μακρινού πεδίου στην οποία επικρατών όρος είναι η

$$\text{παράγωγος του ρεύματος } \frac{\partial i(z, t - \frac{R}{c})}{\partial t}.$$

Στην ίδια εργασία του ο D. Pommerenke [19] έχει μελετήσει τη μεταβολή του μαγνητικού πεδίου συναρτήσει της απόστασης. Εάν η παράγωγος του ρεύματος δεν είναι επικρατούσα, δηλαδή  $\frac{\partial i}{\partial t} = 0$  τότε το μαγνητικό πεδίο μπορεί να υπολογιστεί

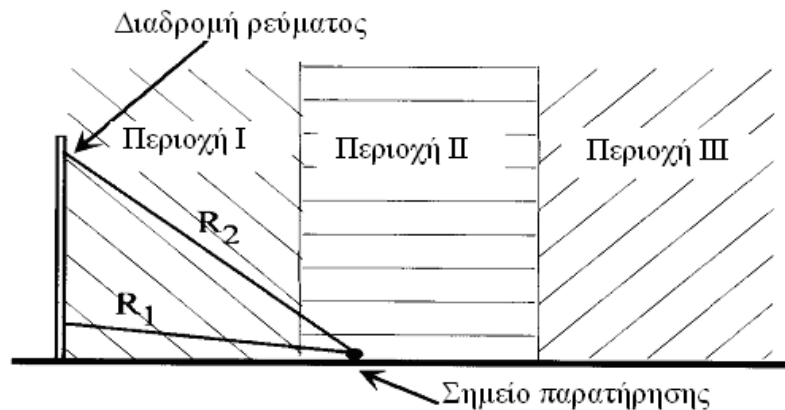
από τη σχέση 3.5:

$$H_{\phi}(\rho, z, t) = \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot \rho} \cdot \frac{\ell}{\sqrt{\rho^2 + \ell^2}} \quad (3.5)$$

Αντίθετα όταν  $\rho \gg \ell$  ή  $\rho \ll \ell$  ισχύει ο νόμος του Ampere και το μαγνητικό πεδίο μπορεί να περιγραφεί από την εξίσωση 3.6:

$$H_{\phi}(\rho, z, t) = \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot \rho} \quad (3.6)$$

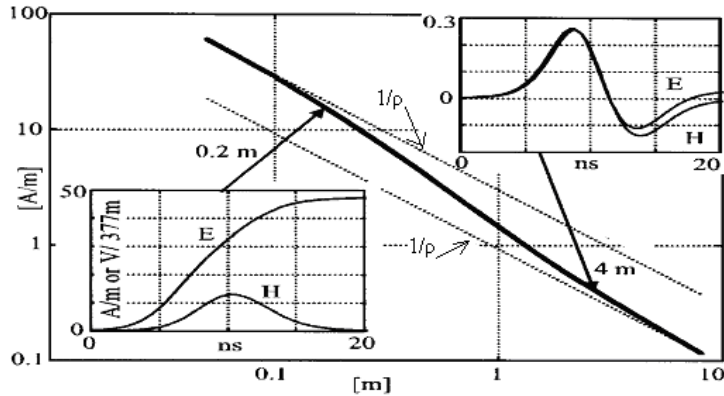
Στο μαγνητικό πεδίο μπορούμε να διακρίνουμε τρεις περιοχές όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2:



Σχήμα 3.2: Μεταβολή του μαγνητικού πεδίου συναρτήσει της απόστασης

Στην περιοχή I το μαγνητικό πεδίο μεταβάλλεται συναρτήσει του παράγοντα  $1/\rho$ . Οι κυματομορφές ρεύματος και πεδίου είναι σχεδόν ίδιες. Στην περιοχή II το πεδίο μεταβάλλεται συναρτήσει του παράγοντα  $1/\rho^2$  ενώ στην περιοχή III βάση του  $1/\rho$ . Στα Σχήματα 3.3 και 3.4 φαίνεται η μεταβολή του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου για απόσταση από 0.1 m ως 10 m. Στο Σχήμα 3.3 εμφανίζεται το παραγόμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο για εκφορτίσεις αέρα, όπου το ρεύμα μεταβάλλεται ως τη

μέγιστη τιμή του με αργό ρυθμό ( $t_r=4$  ns) ενώ στο Σχήμα 3.4 παρουσιάζεται το παραγόμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο για εκφορτίσεις αέρα, όπου το ρεύμα εκφόρτισης μεταβάλλεται πολύ γρήγορα ( $t_r=377$  psec). Άλλωστε οι διαφορετικοί χρόνοι ανόδου είναι απόλυτα λογικοί εφόσον στις εκφορτίσεις αέρα το ρεύμα εκφόρτισης είναι κάθε φορά διαφορετικό και εξαρτάται από τα μήκη τόξου, την υγρασία και την ταχύτητα προσέγγισης του πιστολιού.

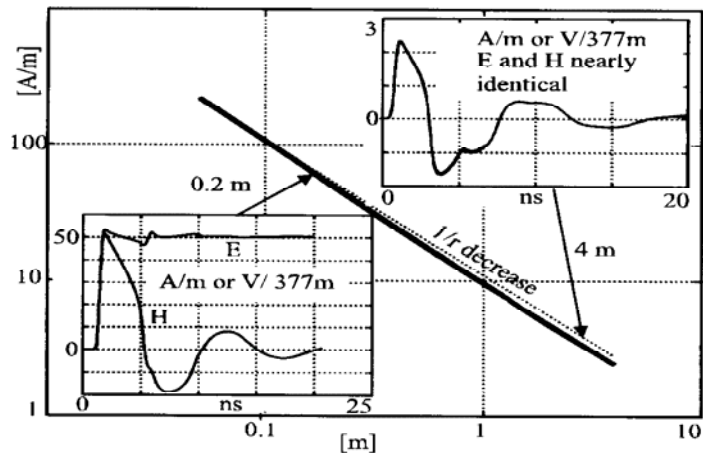


Σχήμα 3.3: Μεταβολή της κορυφής του μαγνητικού πεδίου από το σημείο εκφόρτισης συναρτήσει της απόστασης.

Στο Σχήμα 3.3 έχουμε ανάπτυξη τόξου σε απόσταση 2,7 mm από το δοκίμιο υπό τάση 10 kV και ο χρόνος ανόδου του ρεύματος είναι αργός της τάξης των 4 ns. Το ηλεκτρικό πεδίο φθάνει τη μέγιστη τιμή του μετά από 20 ns και με χρόνο ανόδου 10 ns για την κοντά στο δοκίμιο περιοχή. Σε μακρινότερες αποστάσεις ο χρόνος ανόδου τόσο για το μαγνητικό όσο και για το ηλεκτρικό πεδίο είναι της τάξης των 4 ns. Οι περιοχές I, II και III μπορούν εύκολα να αναγνωριστούν. Στην περιοχή κοντά στο δοκίμιο οι κυματομορφές του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου είναι πολύ διαφορετικές, αλλά στην απόσταση των 4 m παρουσιάζονται σχεδόν ίδιες.

Κοντά στο σφαιροειδές το πεδίο μειώνεται βάσει του παράγοντα  $1/r$  και συνεπώς βρισκόμαστε στην περιοχή I. Σε απόσταση γύρω στα 0,2 m το πεδίο αρχίζει να μειώνεται γρηγορότερα σύμφωνα με το λόγο  $1/r^2$  οπότε βρισκόμαστε στην περιοχή II. Από τα 2 m και μετά η μείωση ακολουθεί το λόγο  $1/r$ , οπότε έχουμε περάσει στην περιοχή III.

Στο Σχήμα 3.4 έχουμε ανάπτυξη τόξου σε απόσταση 1,22 mm από το δοκίμιο υπό τάση 10 kV, ενώ έχουμε γρήγορο χρόνο ανόδου του ρεύματος της τάξης των 377 ps.



Σχήμα 3.4: Μεταβολή της κορυφής του μαγνητικού πεδίου από το σημείο εκφόρτισης συναρτήσει της απόστασης

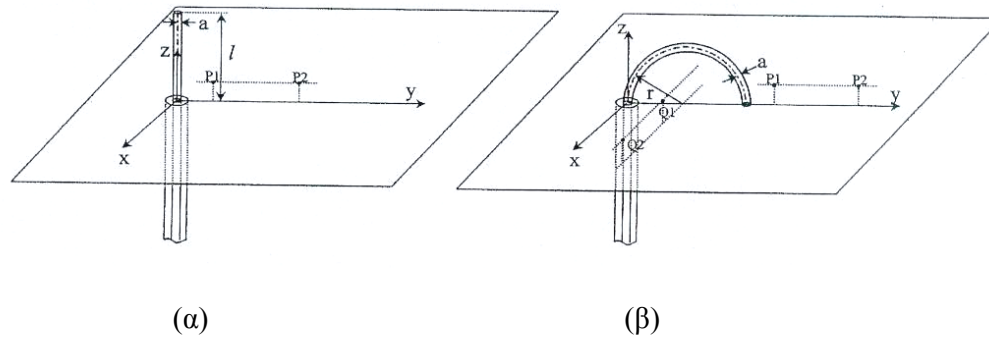
Σε αυτή την περίπτωση το πεδίο μειώνεται βάσει του παράγοντα  $1/r$  λόγω της παραγωγής της σχέσης (3.4) που αρχίζει πλέον να κυριαρχεί κοντά στο σφαιροειδές. Η αλλαγή της κυματομορφής, η οποία καθορίζεται από το ρεύμα σε κοντινές αποστάσεις και την παράγωγό του σε μακρινότερες όπως φαινόταν στην προηγούμενη περίπτωση όπου είχαμε αργό χρόνο ανόδου του ρεύματος εδώ δεν είναι πλήρως ορατή.

### 3.5 Μεταβατικά ηλεκτρομαγνητικά πεδία προερχόμενα από ρεύμα ηλεκτροστατικής εκφόρτισης

Έρευνα του Πανεπιστημίου της Ανκόνα στην Ιταλία, υπό τον καθηγητή του τομέα Ηλεκτρονικής και Ελέγχου [26], τόσο σε θεωρητικό όσο και σε πειραματικό επίπεδο, αποτίμησε διεξοδικά το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, παραγόμενο από ηλεκτροστατική εκφόρτιση.

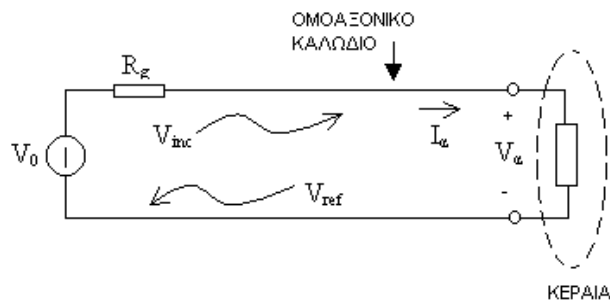
#### 3.5.1 Θεωρητική προσέγγιση

Οι γεωμετρίες που ελήφθησαν υπόψη για τη θεωρητική προσέγγιση παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.5.



Σχήμα 3.5: (α) Μονόπολο, πάνω σε γειωμένο επίπεδο, τροφοδοτούμενο από ομοαξονικό καλώδιο. (β) Ημικύκλιο, πάνω σε γειωμένο επίπεδο, τροφοδοτούμενο από ομοαξονικό καλώδιο.

Η συγκεκριμένη διάταξη επιλέχθηκε, διότι αφενός παρέχει την ένταση και την κυματομορφή του εκπεμπόμενου πεδίου από μία ηλεκτροστατική εκφόρτιση, αφετέρου είναι υλοποιήσιμη και στην πειραματική προσέγγιση. Μέσω του ομοαξονικού καλωδίου, ο παλμός ηλεκτροστατικής εκφόρτισης οδηγείται στους δυο αισθητήρες μέτρησης του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου. Η ανάλυση γίνεται με τη ‘Μέθοδο των Ροπών Στο Πεδίο Του Χρόνου’ (Method of Moments in Time Domain, MoMTD) εφαρμοσμένη στην ‘Τροποποιημένη Ολοκληρωτική Εξίσωση Ηλεκτρικού Πεδίου’ (Modified Electric Field Integral Equation, EFIE) για το ρεύμα κατά μήκος της κεραίας. Η EFIE τροποποιείται για να ερμηνεύει την ανάκλαση που δημιουργείται στη θύρα εισόδου των πηγών ακτινοβολίας, όταν αυτές τροφοδοτούνται από το ομοαξονικό καλώδιο. Υποθέτοντας γειωμένο επίπεδο απείρου μήκος εφαρμόζεται η θεωρία των ειδώλων. Παραλείπεται λοιπόν το άπειρο επίπεδο και προκύπτουν ένα δίπολο και ένας βρόγχος. Το ισοδύναμο κύκλωμα της διάταξης, υποθέτοντας τροφοδοσία από πραγματική πηγή προκειμένου να επιτευχθεί καλύτερη προσέγγιση με τα πειραματικά αποτελέσματα, είναι το ακόλουθο:



Σχήμα 3.6: Ισοδύναμο κύκλωμα διάταξης.

Μία πραγματική πηγή εσωτερικής αντίστασης  $R_g$  τροφοδοτεί γραμμή μεταφοράς χαρακτηριστικής σύνθετης αντίστασης  $Z_0$ , χωρίς απώλειες. Το ρόλο του φορτίου διαδραματίζει η κεραία. Έτσι, η τάση  $V_a$  στα άκρα της κεραίας μπορεί να υπολογισθεί με χρήση απλής θεωρίας γραμμών μεταφοράς. Υποθέτοντας πως  $R_g=Z_0$ , προκύπτει πως:

$$V_a = V_0 - Z_0 I_a \quad (3.6)$$

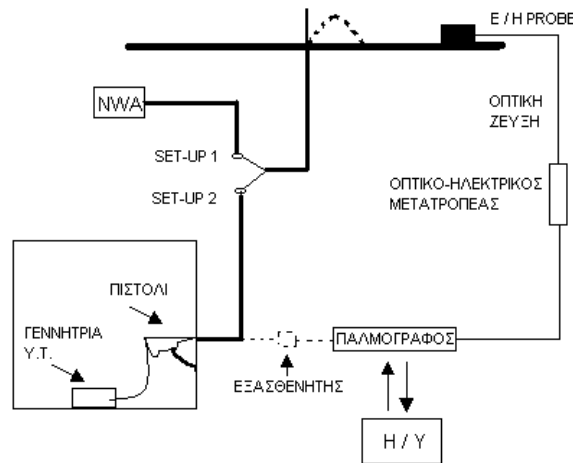
Η τροποποιημένη (διαφορική) μορφή της EFIE έχει ως εξής:

$$\frac{\partial \bar{E}^i(s,t)}{\partial t} \cdot \hat{s} = E_1 \frac{\partial V_0(t-\frac{R}{c})}{\partial t} + E_2 \frac{\partial^2 V_0(t-\frac{R}{c})}{\partial t^2} + E_3 \frac{\partial^3 V_0(t-\frac{R}{c})}{\partial t^3} - Z_0 \left( E_1 \frac{\partial I_a(t-\frac{R}{c})}{\partial t} + E_2 \frac{\partial^2 I_a(t-\frac{R}{c})}{\partial t^2} + E_3 \frac{\partial^3 I_a(t-\frac{R}{c})}{\partial t^3} \right) \quad (3.7)$$

όπου  $E^i(s,t)$  το εγειρόμενο πεδίο λόγω της γεννήτριας τάσης,  $c$  η ταχύτητα του φωτός,  $R$  η απόσταση μεταξύ της πηγής και ενός σημείου στο πεδίο,  $E_1, E_2, E_3$  συντελεστές εξαρτώμενοι από τις γεωμετρικές παραμέτρους,  $Z_0$  η σύνθετη αντίσταση της γραμμής μεταφοράς και  $\hat{s}$  το μοναδιαίο διάνυσμα εφαπτόμενο στον άξονα σε σημείο του πεδίου.

### 3.5.2 Πειραματική προσέγγιση

Για το πειραματικό μέρος υλοποιείται η διάταξη που παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.7.



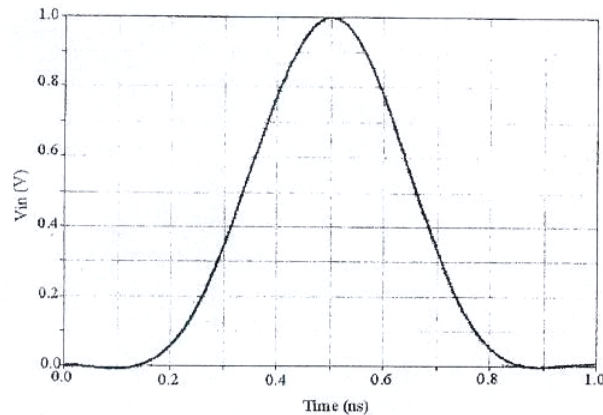
Σχήμα 3.7: Η πειραματική διάταξη.



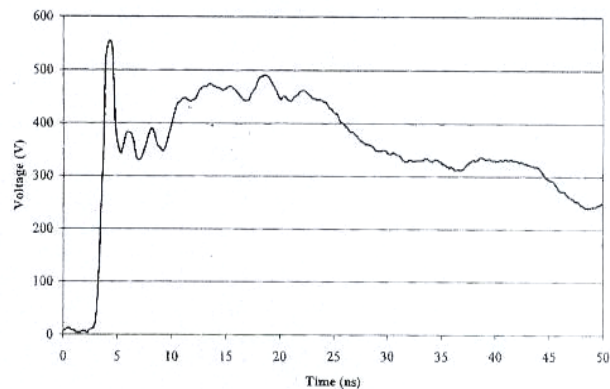
Ένας θηλυκός σύνδεσμος τύπου N τοποθετείται σε γειωμένο επίπεδο αλουμινίου διαστάσεων 1 m x 1 m: ίσιο καλώδιο συγκολλάται στον κεντρικό αγωγό του συνδέσμου δημιουργώντας μονοπολική κεραία. Για τη δημιουργία ημικυκλίου, το καλώδιο καμπυλώθηκε και η άκρη του βιδώθηκε στο επίπεδο.

Δύο είδη σημάτων χρησιμοποιήθηκαν προκειμένου να διεγερθεί η κεραία:

- 1) ένας τεχνητός παλμός (Set-up 1) προερχόμενος από αναλυτή δικτύου (Network Analyzer, NWA) και
- 2) ένας πραγματικός παλμός ηλεκτροστατικής εκφόρτισης (Set-up 2) προερχόμενος από γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων Schaffner NSG-432. Στα Σχήματα 3.8 και 3.9 παρουσιάζεται η μορφή των δύο αυτών παλμών.



Σχήμα 3.8: Ισοδύναμος παλμός παρεχόμενος από το NWA.

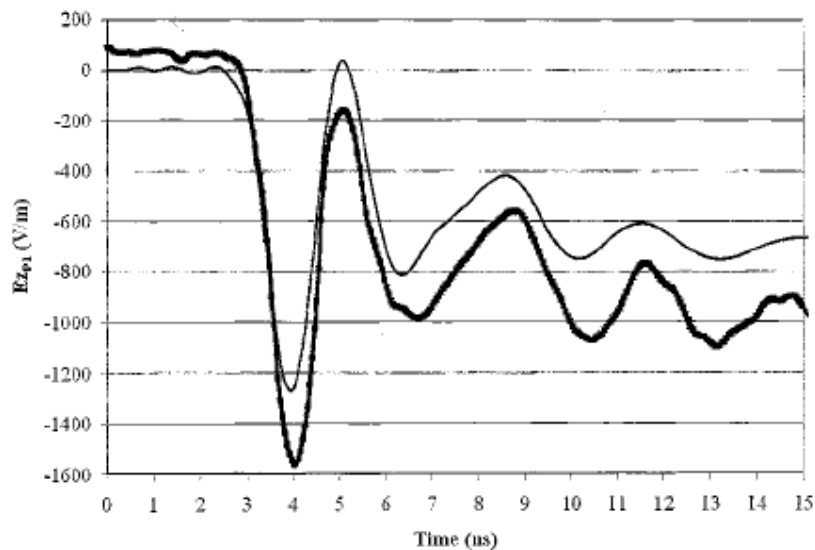


Σχήμα 3.9: Σήμα από τη γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων εκτελώντας εκφόρτιση στα 4 kV υπό φορτίο 50 Ω.

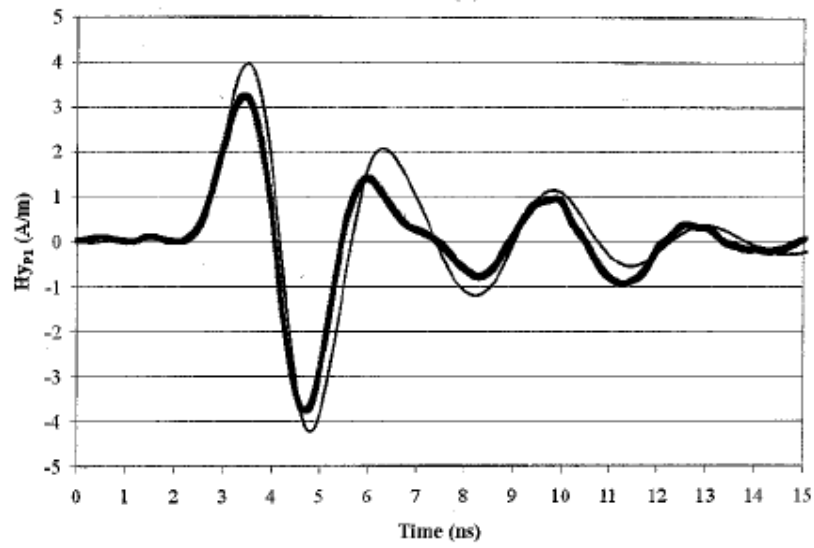
### 3.5.3 Συγκριτικά αποτελέσματα

#### 3.5.3.1 Στο μονόπολο

Με βάση το Σχήμα 3.5(α) τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία εκτιμήθηκαν στα σημεία P1 και P2 κατά μήκος του άξονα  $y$  και σε αποστάσεις  $y_{P1} = 10$  cm,  $y_{P2} = 40$  cm από το μονόπολο, σε ύψη  $z_{P1} = z_{P2} = 4$  cm από το γειωμένο επίπεδο. Οι τιμές αυτές επιλέγονται καθώς είναι αντιπροσωπευτικές της πραγματικής κατάστασης σε μία έμμεση εκφόρτιση (όσον αφορά τις αποστάσεις) και με γνώμονα τη διάσταση των αισθητήρων του ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου (όσον αφορά την υψομετρική διαφορά από το γειωμένο επίπεδο). Στα Σχήματα 3.10 και 3.11 τα οποία ακολουθούν, αντιπαραβάλλονται τα θεωρητικά και τα πειραματικά αποτελέσματα για το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο.



(α)

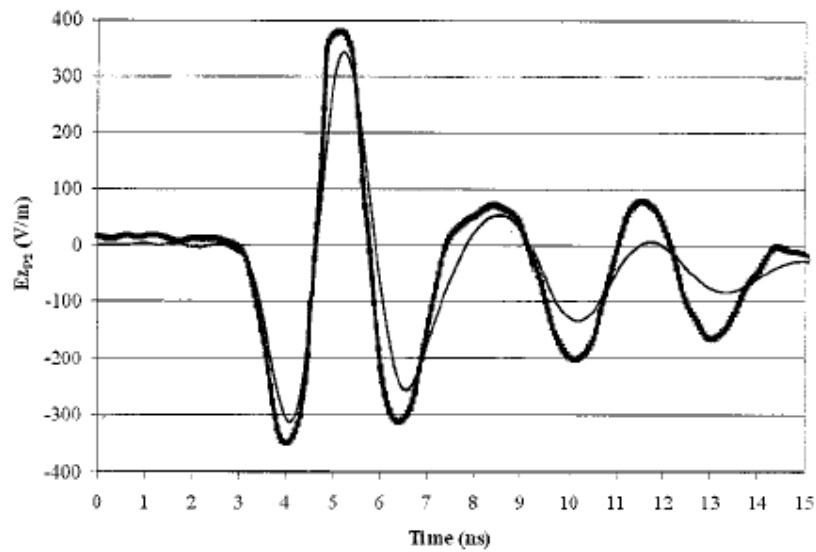


(β)

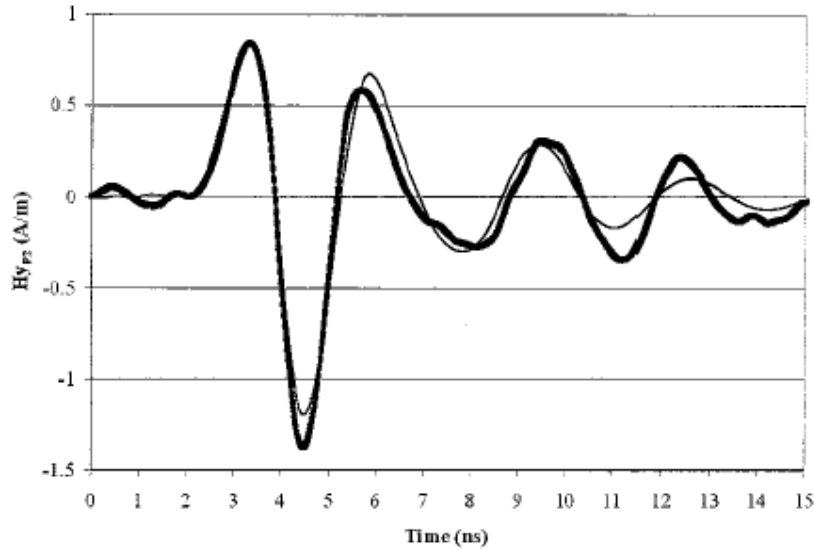
Σχήμα 3.10: Συγκριτικά αποτελέσματα για το μονόπολο για το σημείο P1

$$(y_{P1} = 10 \text{ cm}, z_{P1} = 4 \text{ cm})$$

(α) Ηλεκτρικό πεδίο, (β) Μαγνητικό πεδίο.



(α)



(β)

Σχήμα 3.11: Συγκριτικά αποτελέσματα για το μονόπολο για το σημείο P2

$$(y_{P2} = 40 \text{ cm}, z_{P2} = 4 \text{ cm})$$

(α) Ηλεκτρικό πεδίο, (β) Μαγνητικό πεδίο.

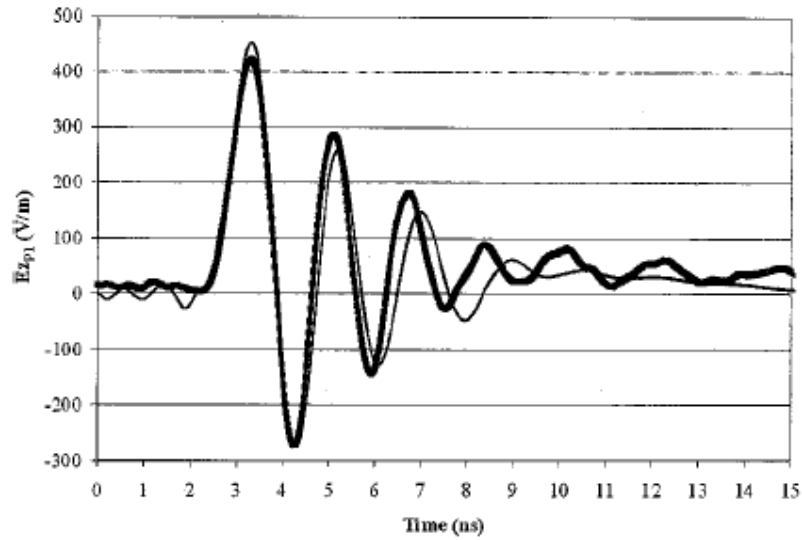
Η λεπτή γραμμή, αντιστοιχεί στα θεωρητικά αποτελέσματα.

Για το ηλεκτρικό πεδίο, παρατηρείται πως η συνιστώσα χαμηλής συχνότητας που υπερτίθεται στην κυμάτωση στο εγγύς πεδίο (σημείο P1) εξαφανίζεται στο μακρινό πεδίο (σημείο P2). Αυτό οδηγεί σε διαφορετικές κυματομορφές για τα δύο σημεία. Από την άλλη, το μαγνητικό πεδίο δεν επηρεάζεται από τα ηλεκτρικό φορτίο και για το λόγο αυτό οι κυματομορφές είναι όμοιες για τα δύο σημεία (εάν εξαιρεθεί ο παράγων κλιμάκωσης  $\frac{1}{4}$  ο οποίος απορρέει από τον παράγοντα εξασθένισης του πεδίου  $1/r$ ). Επιπρόσθετα, αντιπαραβάλλοντας το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο στο σημείο P2 παρατηρούνται παρόμοιες κυματομορφές και ο τυπικός λόγος των  $377 \Omega$ .

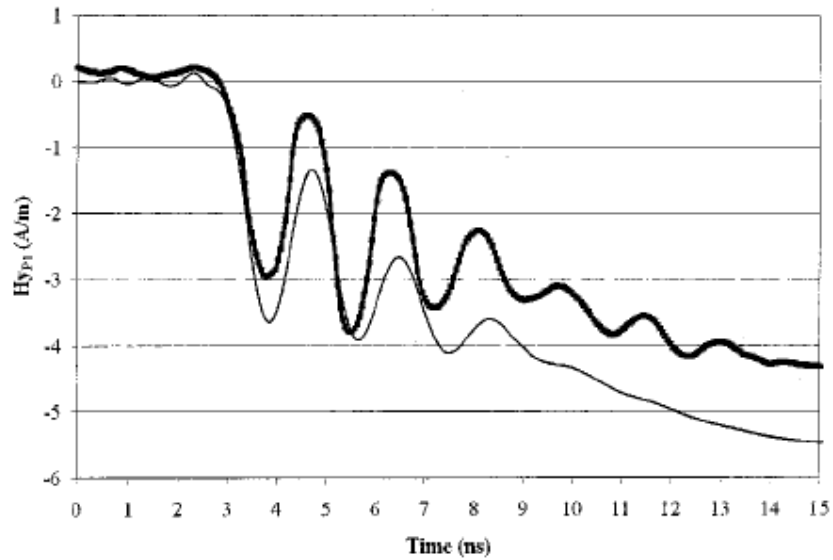
### 3.5.3.1 Στο ημικύκλιο

Με βάση το Σχήμα 3.5(α) τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία εκτιμήθηκαν στα σημεία P1 και P2 κατά μήκος του άξονα  $y$  και σε αποστάσεις  $y_{P1} = 10 \text{ cm}$ ,  $y_{P2} = 40 \text{ cm}$  από το ημικύκλιο και διαμήκως στο ημικυκλίο στα σημεία Q1, Q2 σε αποστάσεις  $x_{Q1} = 10 \text{ cm}$  και  $x_{Q2} = 40 \text{ cm}$  από το κέντρο του ημικυκλίου. Όλα τα σημεία, είναι σε ύψος  $4 \text{ cm}$  από το γειωμένο επίπεδο. Καθώς η διάταξη δεν είναι συμμετρική όπως στην περίπτωση του μονόπολου, αναμένεται διαφορετική δομή πεδίου κατά μήκος των

δύο αξόνων. Στα Σχήματα 3.12, 3.13, 3.14 και 3.15 αντιπαραβάλλονται τα θεωρητικά και τα πειραματικά αποτελέσματα για το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο.



(α)

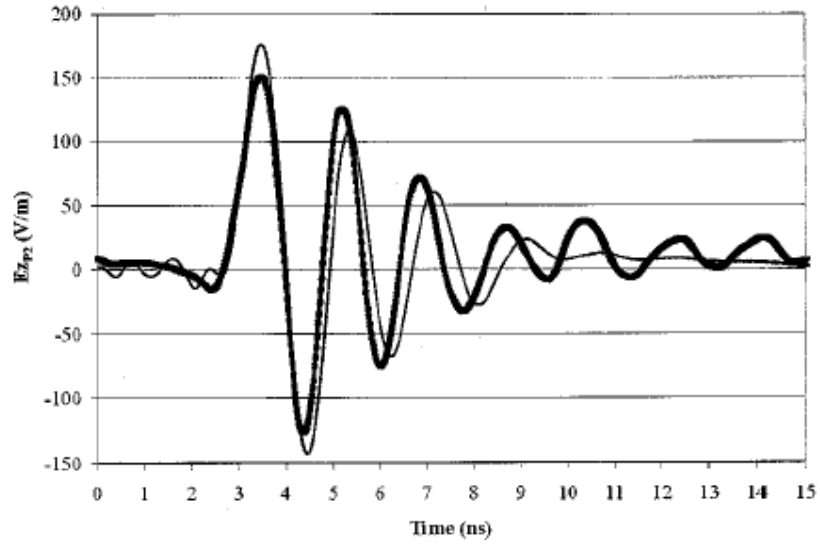


(β)

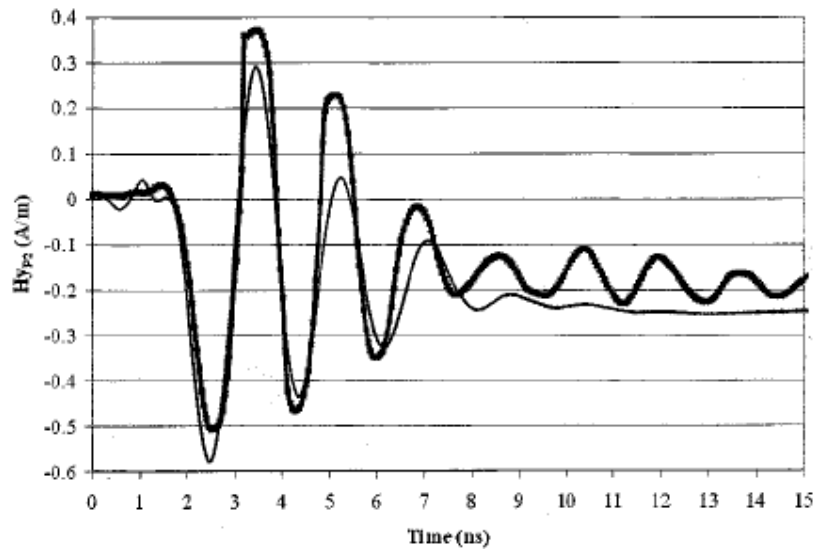
Σχήμα 3.12: Συγκριτικά αποτελέσματα για το ημικόκλιο για το σημείο P1

$$(y_{PI} = 10 \text{ cm})$$

(α) Ηλεκτρικό πεδίο, (β) Μαγνητικό πεδίο.



(α)

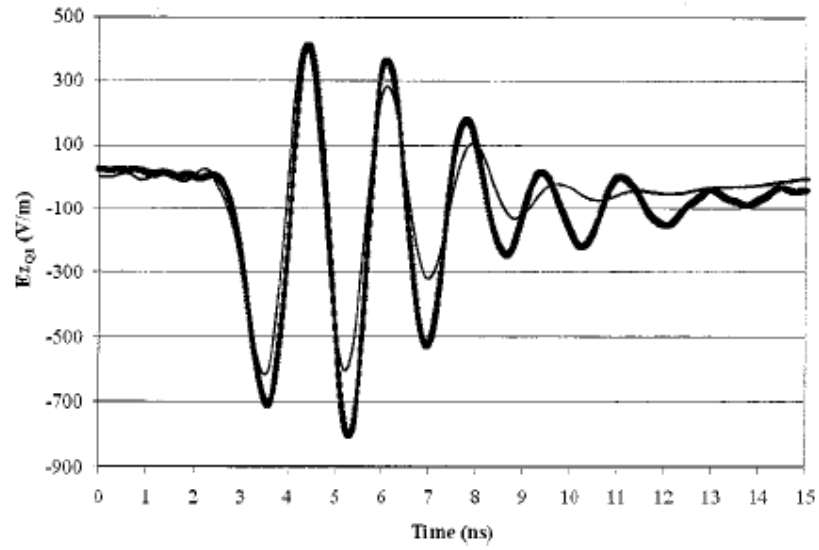


(β)

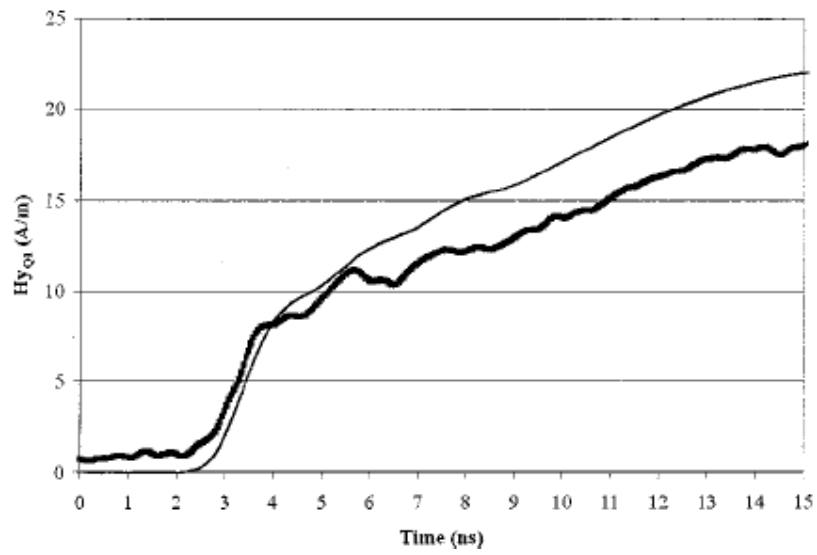
Σχήμα 3.13: Συγκριτικά αποτελέσματα για το ημικόκλιο για το σημείο P2

$$(y_{P2} = 10 \text{ cm})$$

(α) Ηλεκτρικό πεδίο, (β) Μαγνητικό πεδίο.



(α)

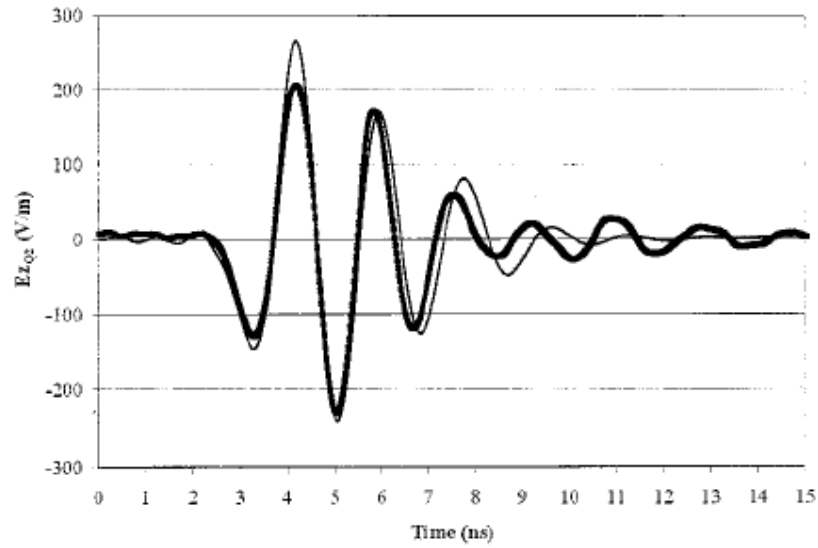


(β)

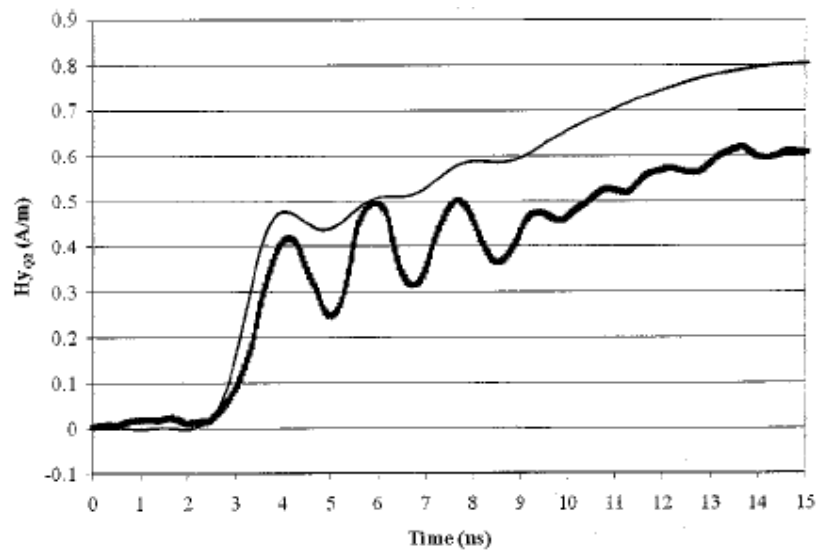
Σχήμα 3.14: Συγκριτικά αποτελέσματα για το ημικόκλιο για το σημείο  $Q1$

$$(x_{Q1} = 10 \text{ cm})$$

(α) Ηλεκτρικό πεδίο, (β) Μαγνητικό πεδίο.



(α)



(β)

Σχήμα 3.15: Συγκριτικά αποτελέσματα για το ημικόκλιο για το σημείο  $Q2$

$$(x_{Q2} = 40 \text{ cm})$$

(α) Ηλεκτρικό πεδίο, (β) Μαγνητικό πεδίο.

Η λεπτή καμπύλη αντιστοιχεί στα θεωρητικά αποτελέσματα.

Για τα σημεία P1 και P2 συμπεραίνεται διττή συμπεριφορά των πεδίων σε σχέση με την περίπτωση του μονόπολου. Το ηλεκτρικό πεδίο χαρακτηρίζεται από ομαλή και



γρήγορη κυμάτωση ενώ το μαγνητικό πεδίο από μία σημαντική συνιστώσα χαμηλής συχνότητας, πιο ορατή στο σημείο P1. Στο σημείο P2, η συνιστώσα αυτή έχει μειωθεί κατά πολύ.

Όσον αφορά τα σημεία Q1 και Q2 το ηλεκτρικό πεδίο δείχνει περισσότερο ομαλό αλλά η εξασθένιση μεταξύ των σημείων Q1 και Q2 υπονοεί μία σύνθετη κατανομή πεδίου εξαιτίας της εγγύτητας της πηγής και της ανομοιομορφίας του ρεύματος κατά μήκος της δομής. Το μαγνητικό πεδίο κοντά στο βρόγχο είναι ανάλογο του ρεύματος σε αυτόν. Η φύση του πεδίου, επιβεβαιώνεται από τη μορφή του για το σημείο Q2. Επίσης, μακριά από την πηγή, μία υψίσυχη κυμάτωση υπερτίθεται στο ημιστατικό πεδίο.

#### **3.5.4 Συμπερασματικά**

Συγκρίνοντας θεωρητικά και πειραματικά αποτελέσματα και αναγνωρίζοντας την πιθανότητα των πειραματικών αποκλίσεων, σημειώνεται ικανοποιητική συμφωνία μεταξύ πειραματικών και θεωρητικών δεδομένων. Το σφάλμα στα πλάτη των πεδίων δεν ξεπερνά ποτέ τα 2-3 dB, κάτι το οποίο είναι απόλυτα δεκτό.

#### **3.6 Η ενέργεια της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης**

Ο Jan Stoka [20], έχει ασχοληθεί με τα γεγονότα που λαμβάνουν χώρα κατά τη διαδικασία της ηλεκτρομαγνητικής εκφόρτισης από ένα φορτισμένο ανθρώπινο σώμα προς ένα δοκίμιο. Λίγο πριν την πραγματοποίηση της εκφόρτισης, έχουμε την ανάπτυξη ενός ηλεκτροστατικού πεδίου μεταξύ των δακτύλων του ανθρώπινου σώματος που θα έρθει σε επαφή με το δοκίμιο και του δοκιμίου. Η υψηλή τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, μπορεί να προκαλέσει ιονισμό των μορίων του αέρα από κρούσεις ηλεκτρονίων. Ο ιονισμός αυτός, αποτελεί το πρώτο βήμα για τη δημιουργία της ηλεκτρομαγνητικής εκφόρτισης. Το επόμενο βήμα είναι η δημιουργία ενός αγωγίμου δρόμου μεταξύ του δακτύλων του ανθρώπινου σώματος και του δοκιμίου είτε αυτά βρεθούν πολύ κοντά είτε έρθουν σε επαφή. Το αναπτυσσόμενο ρεύμα, δημιουργεί ένα μαγνητικό πεδίο με μεγάλη πυκνότητα μαγνητικής ενέργειας και έτσι εξηγείται το γεγονός ότι μέρος της ενέργειας του ηλεκτρικού πεδίου μετατρέπεται σε ενέργεια του μαγνητικού πεδίου. Στη συνέχεια, το ρεύμα θα προχωρήσει στα αγωγίμα εξαρτήματα μεταφέροντας το φορτίο σε αυτά. Το ηλεκτρικό πεδίο, μειώνεται. Η ροή του ηλεκτρικού ρεύματος και η μείωση του

ηλεκτρικού πεδίου, διαδίδονται κατά μήκος των αγωγίμων επιφανειών με την ταχύτητα του φωτός.

Ο παραπάνω τύπος κύματος, δεν μπορεί να μεταφέρει αρκετή ενέργεια σε μακρινές αποστάσεις. Εξαιτίας του σχήματος των αγωγίμων επιφανειών, το κύμα διασκορπίζεται έτσι ώστε ένα μέρος του να διαδίδεται στον ελεύθερο χώρο, ενώ ένα άλλο να υφίσταται ανάκλαση στις παραπάνω επιφάνειες. Έτσι μπορούμε να θεωρήσουμε ότι αναπτύσσονται διαφορετικά κέντρα ενέργειας κάθε ένα από τα οποία θα εκφορτιστεί ξεχωριστά.

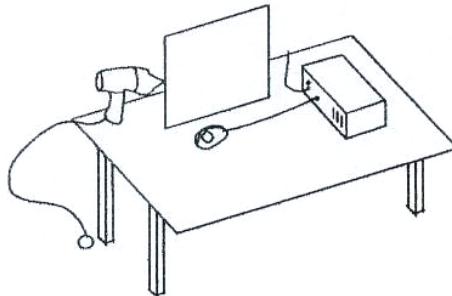
Όπως γνωρίζουμε, η κυματομορφή του ρεύματος παρουσιάζει ένα δεύτερο μέτωπο κατά την εκφόρτιση. Το δεύτερο αυτό μέτωπο στα παραπάνω κέντρα ενέργειας, η εκφόρτιση των οποίων μπορεί να πάρει χρόνο αφού το κύμα ταξιδεύει από και προς την αγωγίμη επιφάνεια και ο χρόνος αυτός εξαρτάται από τη διάρκεια του παλμού.

### **3.7 Ρεύματα και πεδία ηλεκτροστατικής εκφόρτισης σε κατακόρυφο επίπεδο ζεύξης (VCP) και σε οριζόντιο επίπεδο ζεύξης (HCP)**

Εκτός από τη μεταβολή του μαγνητικού πεδίου σε συνάρτηση με την απόσταση, ο David Pommerenke [27], έχει ασχοληθεί και με τη μορφή του ρεύματος και των πεδίων (ηλεκτρικό και μαγνητικό) τα οποία παράγονται από ηλεκτροστατική εκφόρτιση σε κατακόρυφο επίπεδο ζεύξης (VCP) και σε οριζόντιο επίπεδο ζεύξης (HCP).

#### **3.7.1 Ανάλυση του κατακόρυφου επιπέδου ζεύξης (VCP)**

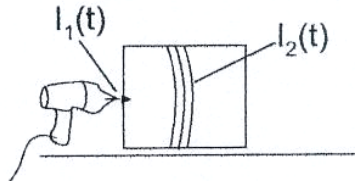
Μία τυπική δοκιμή, που υλοποιείται σε κατακόρυφο επίπεδο ζεύξης είναι η ακόλουθη στο Σχήμα 3.16.



*Σχήμα 3.16: Τυπική δοκιμή σε κατακόρυφο επίπεδο ζεύξης-Ζεύξη του σήματος στο καλώδιο του ποντικιού του H/Y*

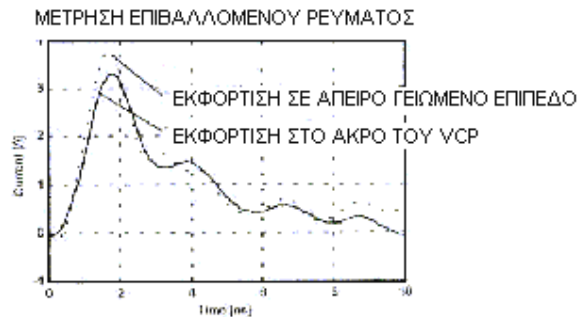
### 3.7.1.1 Το εγχύμενο ρεύμα

Το ρεύμα εγχύεται στο κατακόρυφο επίπεδο ζεύξης όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.17.



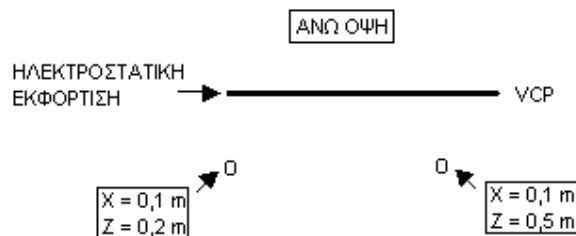
Σχήμα 3.17: Μοντέλο για την περιγραφή του VCP ρεύματος

Με βάση το Σχήμα 3.18 όπου παρουσιάζεται γραφικά το ρεύμα το οποίο εγχύεται στο κατακόρυφο επίπεδο ζεύξης σε αντιπαραβολή με το ρεύμα το οποίο μετράται κατά τη βαθμονόμηση της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων (εκφόρτιση σε άπειρο γειωμένο επίπεδο), αποδεικνύεται πως τα δύο αυτά μεγέθη είναι όμοια.



Σχήμα 3.18: Ρεύμα στο κατακόρυφο επίπεδο ζεύξης σε αντιπαραβολή με το ρεύμα εκφόρτισης στο 1kV σε γειωμένο επίπεδο απείρου μήκους.

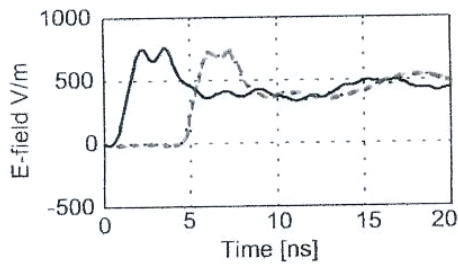
Εν συνεχεία αποδεικνύεται πειραματικά πως το εγχύμενο ρεύμα ( $I_1(t)$ ) χρησιμοποιεί το κατακόρυφο επίπεδο ζεύξης ως γραμμή μεταφοράς προκειμένου να διαδοθεί ( $I_2(t)$ ). Η διάταξη παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.19.



Σχήμα 3.19: Θέσεις των αισθητήρων. Μήκος επιπέδου (VCP) 1 m.

Πιο συγκεκριμένα, κατακόρυφο επίπεδο ζεύξης μήκους 1 m στήθηκε πάνω από οριζόντιο επίπεδο ζεύξης στο οποίο και τοποθετήθηκαν αισθητήρες σε δύο διαφορετικά σημεία του, ( $X = 0,1 \text{ m}$ ,  $Z = 0,2 \text{ m}$ ) και ( $X = 0,1 \text{ m}$ ,  $Z = 0,5 \text{ m}$ ), προκειμένου να μετρήσουν το πεδίο.

Τα αποτελέσματα είχαν ως εξής:

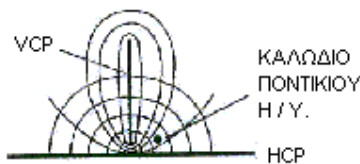


Σχήμα 3.20: Τα πεδία όπως προέκυψαν για τις θέσεις  $Z = 0,2 \text{ m}$  και  $Z = 0,5 \text{ m}$ .

Το φαινόμενο αυτό δείχνει πως σε απόσταση 0,1 m από το σημείο εκφόρτισης έχει δημιουργηθεί ένα κύμα το οποίο διασχίζει το κατακόρυφο επίπεδο ζεύξης. Οι διαφορές στις κυματομορφές του παραπάνω σχήματος φανερώνουν πως μέρος του αρχικού ρεύματος δε συμμετέχει στο διαδιδόμενο, στο κατακόρυφο επίπεδο ζεύξης, κύμα ρεύματος.

### 3.7.1.2 Η δομή του πεδίου

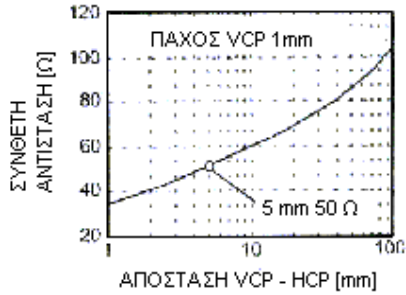
Η δομή ‘κατακόρυφο επίπεδο ζεύξης υπερκείμενο οριζόντιου επιπέδου ζεύξης’ αποτελεί γραμμή μεταφοράς. Η δομή του πεδίου φαίνεται στο Σχήμα 3.21.



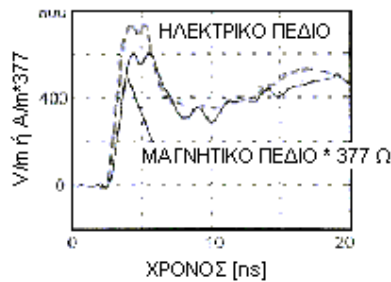
Σχήμα 3.22: Σχηματική αναπαράσταση της δομής του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου γύρω από το ζευγάρι VCP/HCP.

Αυτό το μοντέλο είναι βάσιμο για τα πρώτα μόνο ns καθώς το κύμα θα ανακλαστεί στο τέλος του κατακόρυφου επιπέδου ζεύξης. Στην αρχική χρονική περίοδο οι ρυθμοί μεταβολής τόσο του ηλεκτρικού όσο και του μαγνητικού πεδίου μεγιστοποιούνται. Η δριμύτητα του παλμού της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης

μεγιστοποιείται με τη μεγιστοποίηση των ρυθμών μεταβολής των πεδίων. Με την πάροδο του χρόνου κυριαρχεί ένα στατικό πεδίο. Στο σχήμα 3.23 δίδεται η σύνθετη αντίσταση της γραμμής μεταφοράς κατακόρυφου επιπέδου ζεύξης-οριζόντιου επιπέδου ζεύξης.



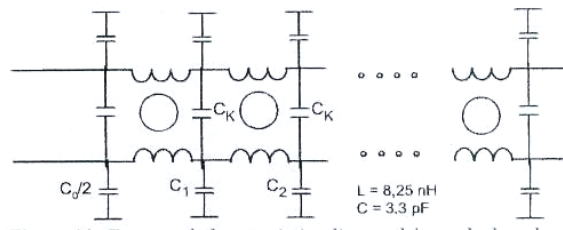
Σχήμα 3.23: Σύνθετη αντίσταση της γραμμής μεταφοράς VCP-HCP.



Σχήμα 3.24: Ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο στο οριζόντιο πεδίο ζεύξης.

### 3.7.1.3 Μοντέλο συζευγμένης γραμμής μεταφοράς

Η γραμμή μεταφοράς κατακόρυφου επιπέδου ζεύξης-οριζόντιου επιπέδου ζεύξης και η γραμμή μεταφοράς καλώδιου ποντικιού H/Y-οριζόντιου επιπέδου ζεύξης μοντελοποιείται ως δύο συζευγμένες γραμμές μεταφοράς, όπως παρατίθεται στο Σχήμα 3.25.

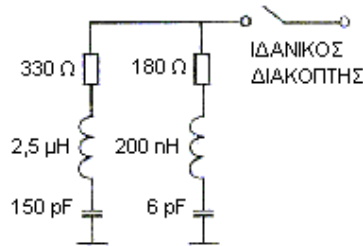


Σχήμα 3.25: Μοντέλο δύο συζευγμένων γραμμών μεταφοράς για τον υπολογισμό της σύζευξης μεταξύ κατακόρυφου επιπέδου ζεύξης και καλώδιου ποντικιού H/Y.

Καθώς ο λόγος αμοιβαίας επαγωγής  $M$  προς αμοιβαία χωρητικότητα  $C_K$  είναι σταθερός, αρκεί ο υπολογισμός μίας εξ αυτών.

### 3.7.1.4 Μοντέλο γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων

Η μοντελοποίηση της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων ως πηγή συνεχούς ρεύματος με αντίσταση πηγής  $330 \Omega$ , δίδεται στο Σχήμα 3.26.



Σχήμα 3.26: Ισοδύναμο κύκλωμα μοντελοποίησης του εγχυόμενου ρεύματος

### 3.7.2 Ανάλυση του οριζόντιου επιπέδου ζεύξης (HCP)

Στο οριζόντιο επίπεδο ζεύξης η εκφόρτιση γίνεται ως ακολούθως. Ο υπό δοκιμή εξοπλισμός τοποθετείται σε απόσταση  $0,1 \text{ m}$  από την άκρη του οριζόντιου επιπέδου ζεύξης. Η εκφόρτιση γίνεται στην άκρη του οριζόντιου επιπέδου ζεύξης και ο χρήστης πρέπει να κρατά τη γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων στο επίπεδο του HCP.

Αυτού του είδους η ανάλυση είναι πιο περίπλοκη από την αντίστοιχη για το κατακόρυφο επίπεδο ζεύξης. Για το λόγο αυτό υποτίθεται πως δεν υπάρχει υπό δοκιμή εξοπλισμός πάνω στο οριζόντιο επίπεδο ζεύξης καθώς σε αντίθετη περίπτωση τα πεδία θα επηραζόνταν.

#### 3.7.2.1 Εξοπλισμός – Διάταξη

Χρησιμοποιούνται δύο είδη διατάξεων. Ένα μεγάλο ημικυκλικό οριζόντιο επίπεδο ζεύξης ακτίνας  $2,4 \text{ m}$  και ένα κανονικού μεγέθους ορθογώνιο οριζόντιο επίπεδο ζεύξης διαστάσεων  $0,8 \text{ m} \times 1,6 \text{ m}$ , αμφότερα τοποθετημένα σε απόσταση  $0,8 \text{ m}$  από το έδαφος.

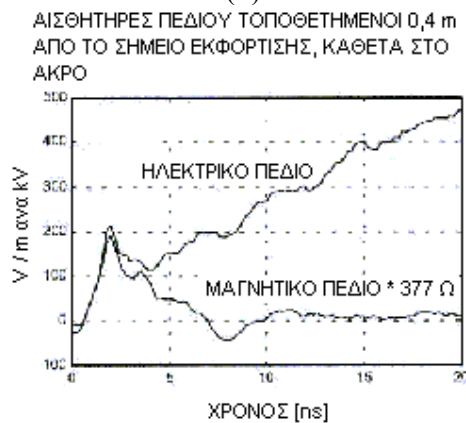
#### 3.7.2.2 Τα πρώτα ns

Το εγχυόμενο στην άκρη του οριζόντιου επιπέδου ζεύξης ρεύμα δημιουργεί ένα κύμα στην πλευρά αυτή, καθώς επίσης και στο πάνω και κάτω μέρος του επιπέδου. Η ένταση του πεδίου στην άκρη του επιπέδου μεταβάλλεται ελαφρώς καθώς το κύμα οδεύει στη γραμμή μεταφοράς που αποτελείται από την άκρη του επιπέδου, τους

πλησιέστερους τοίχους και τη γη. Το οδεύον κύμα στην επιφάνεια του επιπέδου, εκτός από την άκρη αυτού, παράγει πεδίο σύνθετης αντίστασης περί των  $377 \Omega$  του οποίου η δύναμη ελαττώνεται σύμφωνα με το λόγω  $1/\rho$ . Στο Σχήμα 3.27 παρουσιάζονται τα πεδία στην άκρη και στην επιφάνεια του οριζόντιου επιπέδου ζεύξης.



(α)



(β)

Σχήμα 3.27: Ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο: (α) στην άκρη,  $\hat{a} = 0^\circ$ , (β) 0,4 m από την άκρη,  $\hat{a} = 90^\circ$ .

### 3.7.2.3 Ποκνότητα ρεύματος

Όσον αφορά την έγχυση του ρεύματος για την περίπτωση του οριζόντιου επιπέδου ζεύξης ισχύουν παρόμοια με την περίπτωση του κατακόρυφου επιπέδου ζεύξης. Δηλαδή το κύμα εγχύεται μέσα στο επίπεδο, με τη διαφορά πως ρέει και την άκρη αυτού. Μετρώντας το μαγνητικό πεδίο συμπεραίνεται πως το εγχυόμενο ρεύμα για

μια συγκεκριμένη περιοχή του οριζόντιου επιπέδου ζεύξης. Η πυκνότητα ρεύματος δε μεταβάλλεται σημαντικά για γωνίες  $\hat{a}$  μεταξύ 45 και 135 μοιρών. Στο Σχήμα 3.28 εξηγείται η γωνία  $\hat{a}$ .



Σχήμα 3.28: Η γωνία  $\hat{a}$ .

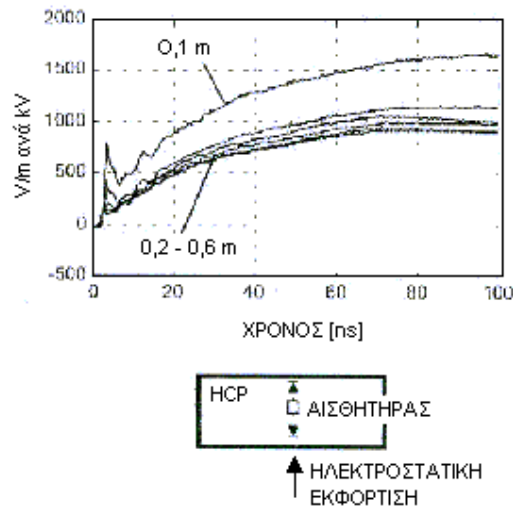
Για γωνία 90 μοιρών το μαγνητικό πεδίο είναι περί τα 0,6 A/m ανά kV σε απόσταση 0,4 m από το σημείο εκφόρτισης, Σχήμα 3.27. Υποθέτωντας συνεχή πυκνότητα ρεύματος συνολικό ρεύμα 0,34 A ρέει μεταξύ 45 – 135 μοιρών και εάν το ίδιο ρεύμα ρέει στην πάνω και στην κάτω επιφάνεια μεταξύ 0 – 45 μοιρών και 135 – 180 μοιρών το συνολικό ρεύμα θα είναι  $0,34 * 4 = 1,36$  A. Βάσει μετρήσεων όμως το συνολικό ρεύμα είναι περί τα 3,75 A έτσι συμπεραίνεται πως η πλειονότητα του ρεύματος ρέει κατά περιμετρικά, εκτός της περιοχής των 45 – 135 μοιρών.

Μετρήσεις στο μεγάλο ημικυκλικό οριζόντιο επίπεδο ζεύξης ακτινας 2,4 m έδειξαν πως το ρεύμα σε ακτίνα 0,2 m και 0,4 m από το σημείο εκφόρτισης είναι συνάρτηση του τετραγώνου της απόστασης κατά μήκος του ημικυκλικού τόξου. Η σχέση αυτή δεν ισχύει για μεγάλες αποστάσεις από το σημείο εκφόρτισης.

#### 3.7.2.4 Με την πάροδο του χρόνου

Με την πάροδο του χρόνου τα κύματα ανακλώνται πολλαπλώς. Μετά από κάθε ανάκλαση το πλάτος τους ελαττώνεται η συνολική φόρτιση όμως παραμένει σταθερή. Καθώς ρέει λιγότερο ρεύμα, αυξάνεται ο λόγος ηλεκτρικού προς μαγνητικό πεδίο έως ότου προκύψουν σχεδόν ηλεκτροστατικές συνθήκες. Μία αργή εξασθένηση του ηλεκτρικού πεδίου προκύπτει από την αντίσταση γείωσης του 1 MΩ που συνδέει το οριζόντιο επίπεδο ζεύξης με το επίπεδο γης. Μετά από 80 ns (κατά προσέγγιση) εμφανίζεται στατικό ηλεκτρικό πεδίο. Στο Σχήμα 3.29 παρουσιάζεται η σταθερότητα του ηλεκτρικού πεδίου μετά τα 80 ns καθώς επίσης και η μεταβολή του με την απόσταση από το σημείο εκφόρτισης.

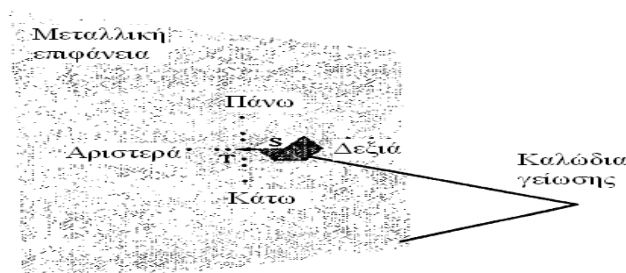




Σχήμα 3.29: Το ηλεκτρικό πεδίο

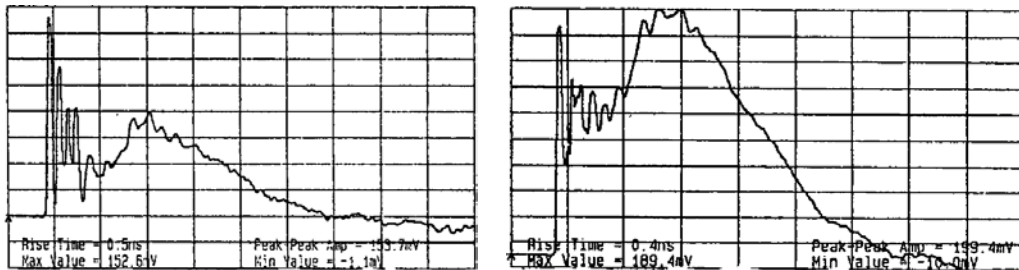
### 3.8 Ανασκόπηση πειραματικών διατάξεων

Όπως έχει παρατηρηθεί από τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις πειραματικές διατάξεις το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο δεν είναι συμμετρικό γύρω από το στόχο τα δε αποτελέσματα που προκύπτουν παρουσιάζουν διαφορές ανάλογα με τις μετρητικές διατάξεις που χρησιμοποιούμε. Ο Jan Sroka [20] μέτρησε το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο σε 12 διαφορετικά σημεία γύρω από το στόχο χρησιμοποιώντας ένα συγκεκριμένο τύπο αισθητήρων και ειδικότερα τα αισθητήρες της Prodyn, ενώ στη συνέχεια πραγματοποίησε τις ίδιες σειρές μετρήσεων με τους αισθητήρες κατασκευής του David Pommerenke. Στο Σχήμα 3.30 παρουσιάζεται η μετρητική διάταξη που χρησιμοποίησε καθώς και τα συμπεράσματα που προκύπτουν για το μαγνητικό και το ηλεκτρικό πεδίο.



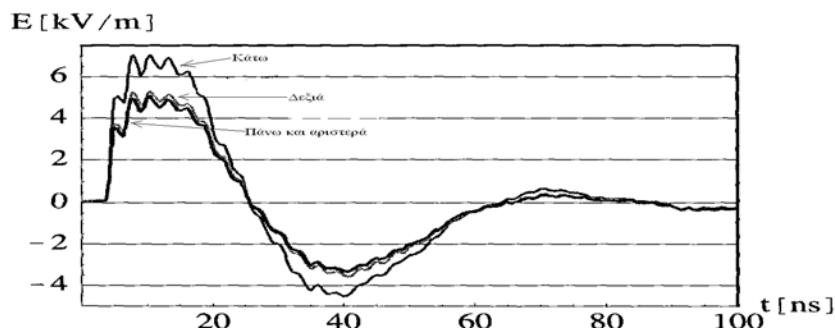
Σχήμα 3.30: Διάταξη για τη μέτρηση του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου γύρω από το στόχο

Τα σημεία που αναφέρονται στο Σχήμα 3.30, ως πάνω, κάτω, αριστερά και δεξιά σχετίζονται με τη θέση που έχουν αυτά ως προς τον τρόπο που τοποθετείται η γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων πάνω στη μεταλλική επιφάνεια. Όσον αφορά το μαγνητικό πεδίο συναρτήσει του χρόνου είναι ανάλογο του ρεύματος. Στην πραγματικότητα για το εγγύς πεδίο στο σημείο εκφόρτισης οι δύο ποσότητες είναι ανάλογες. Για μεγαλύτερες αποστάσεις υπάρχει μια σχετική διαφοροποίηση στις δύο ποσότητες, η οποία οφείλεται στη μεταβολή του ρεύματος. Τα αποτελέσματα δείχνουν, ότι το μαγνητικό πεδίο δεν είναι συμμετρικό στα σημεία γύρω από το στόχο. Παρότι η πρώτη κορυφή έχει το ίδιο ύψος για τα σημεία που βρίσκονται πάνω, κάτω, αριστερά και δεξιά του σημείου εκφόρτισης το ύψος της δεύτερης κορυφής είναι μεγαλύτερο για τα σημεία που βρίσκονται στο κάτω και στο δεξί μέρος όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.31:



Σχήμα 3.31: Αριστερά το μαγνητικό πεδίο σε απόσταση 10cm στο πάνω σημείο ενώ δεξιά το μαγνητικό πεδίο στην ίδια απόσταση στο δεξί σημείο.

Η συμπεριφορά του ηλεκτρικού πεδίου [21] είναι διαφορετική από αυτή του μαγνητικού όσο αφορά τη χαρακτηριστική του ρεύματος. Στο Σχήμα 3.32 φαίνονται οι μετρούμενες τιμές για τα σημεία πάνω, κάτω, δεξιά και αριστερά του σημείου εκφόρτισης.



Σχήμα 3.32: Το ηλεκτρικό πεδίο ( $E$ ) σε απόσταση 10cm από το σημείο εκφόρτισης στα σημεία πάνω, κάτω, αριστερά και δεξιά.

Όπως φαίνεται και από το Σχήμα 3.32 στην περίπτωση του ηλεκτρικού πεδίου υπάρχει μεγαλύτερη συμμετρία στην χαρακτηριστική όσον αφορά τις τέσσερις κατευθύνσεις. Η μόνη διαφορά παρατηρείται στην κάτω θέση και ιδιαίτερα στο ανώτερο και στο κατώτερο σημείο αυτής όπου η ένταση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου παρουσιάζεται μεγαλύτερη από τις άλλες τρεις κατευθύνσεις.

Οι παρατηρήσεις που έγιναν παραπάνω αναφέρονται στις μετρήσεις που έγιναν από τον Jan Sroka με την χρήση των αισθητήρων της Prodyn. Μια δεύτερη σειρά μετρήσεων που πραγματοποίησε ο ίδιος με τους αισθητήρες του David Pommerenke έδωσε σχεδόν παρόμοιες κυματομορφές για το ηλεκτρικό και για το μαγνητικό πεδίο. Οι όποιες διαφορές ανάμεσα στις κυματομορφές που προέκυψαν από τους δυο αυτούς τύπους αισθητήρων εστιάζονται περισσότερο στις μικρότερες αυξομειώσεις του πλάτους του μαγνητικού πεδίου με τους αισθητήρες του David Pommerenke και στο γεγονός των υψηλότερων τιμών ηλεκτρικού πεδίου με τους παραπάνω αισθητήρες.

# Κεφάλαιο 4

## Πειραματική διάταξη

### 4.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται εκτενώς η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε, καθώς και ο εργαστηριακός εξοπλισμός που είναι διαθέσιμος στο εργαστήριο Υψηλών Τάσεων.

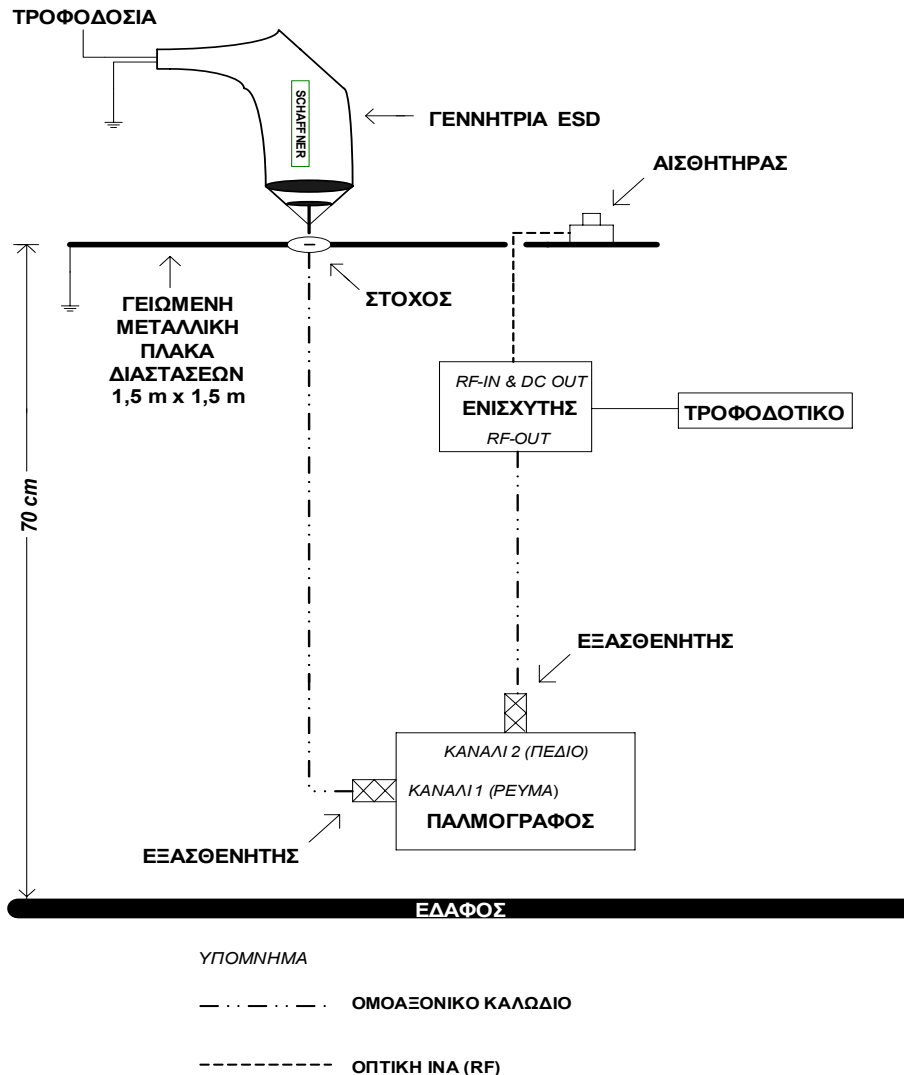
### 4.2 Ο εξοπλισμός του εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων

Για την διεξαγωγή του πειράματος ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε είναι συνοπτικά ο ακόλουθος:

- Γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκκενώσεων (ESD generators) Schaffner.
- Ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης (Pellegrini target).
- Ομοαξονικά καλώδια υψηλής συχνότητας.
- Εξασθενητές (attenuators).
- Παλμογράφος Tektronix TDS 7254B.
- Αισθητήρες της έντασης  $E$  του ηλεκτρικού πεδίου (D. Pommerenke).
- Τροφοδοτικό LG GP-4303D.
- Γειωμένη μεταλλική πλάκα διαστάσεων 1,5 m x 1,5 m.
- Ανηχωικός θάλαμος.

### 4.3 Περιγραφή πειραματικής διάταξης

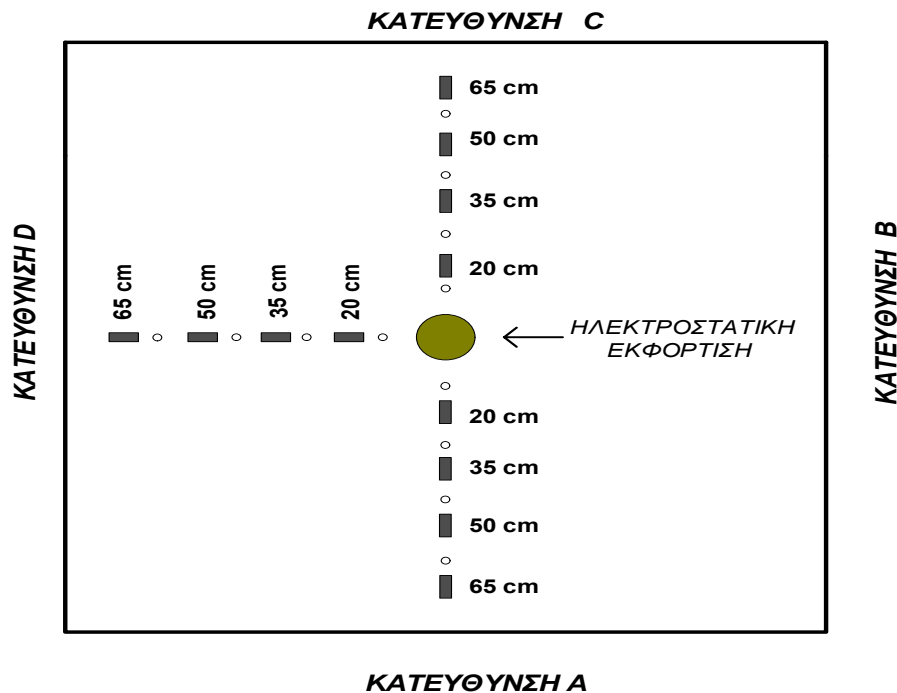
Στο Σχήμα 4.1 παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για την μέτρηση του ρεύματος καθώς και του παραγόμενου ηλεκτρικού πεδίου που αναπτύσσεται κατά την ηλεκτροστατική εκφόρτιση.






Σχήμα 4.1: Η πειραματική διάταξη

Ο παλμογράφος περιλαμβάνει 4 κανάλια και το εύρος ζώνης του κυμαίνεται από dc έως 2,5 GHz. Οι ηλεκτροστατικές εκκενώσεις πραγματοποιήθηκαν με τις γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων. Προκειμένου να μετρήσουμε το ρεύμα της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης και να πάρουμε την κυματομορφή του θα πρέπει να εξασθενήσουμε το αντίστοιχο σήμα. Για αυτό το λόγο χρησιμοποιείται εξασθενητής της Tektronix (011-0059-03). Για το σήμα του παραγόμενου ηλεκτρικού πεδίου απαιτείται η χρήση εξασθενητή. Ο ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης (Pellegrini target), ο οποίος παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.1 ως στόχος, είναι ένας μετατροπέας ρεύματος (current transducer) με τη βοήθεια του οποίου μετράται το εκχυόμενο ρεύμα κατά την ηλεκτροστατική εκφόρτιση. Στη διάταξη χρησιμοποιείται ο MD 101

της Schaffner. Για τη μέτρηση του ηλεκτρικού πεδίου χρησιμοποιήθηκε probe κατασκευής του καθηγητή Ηλεκτρομαγνητικής Συμβατότητας του Πανεπιστημίου του Missouri-Rolla, David Pommerenke. Το probe τοποθετήθηκε σε διαδοχικές αποστάσεις (20cm, 35cm, 50cm και 65cm) προς τρεις κατευθύνσεις (A, C και D), οι οποίες είναι κάθετες μεταξύ τους ως προς το σημείο εκφόρτισης. Δεν έγιναν μετρήσεις ως προς τέταρτη κατεύθυνση (B) διότι οι παρεμβολές του καλωδίου γείωσης της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων (περνούσε ακριβώς πάνω από το probe και σε απόσταση λίγων εκατοστών) προκαλούσαν σοβαρές αλλοιώσεις. Στο Σχήμα 4.2 παρουσιάζεται η τοπολογία της πειραματικής διάταξης.



#### ΥΠΟΜΝΗΜΑ

-  ΣΤΟΧΟΣ (ΟΜΟΑΞΟΝΙΚΟΣ ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΤΗΣ – PELLEGRINI TARGET)
-  ΟΠΗ ΣΤΗ ΛΑΜΑΡΙΝΑ
-  ΘΕΣΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ

Σχήμα 4.2: Θέσεις probe για τη μέτρηση του ηλεκτρικού πεδίου

Τέλος προκειμένου η πειραματική διάταξη να μείνει ανεπηρέαστη από τη λειτουργία γειτονικών συστημάτων το πείραμα πραγματοποιήθηκε σε ανηχωτικό θάλαμο, ο οποίος αποκόπτει συχνότητες ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων έως 1 GHz. Στην Εικόνα 4.1 παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη στο εσωτερικό του ανηχωτικού θαλάμου.



Εικόνα 4.1: Η πειραματική διάταξη στο εσωτερικό του ανηχωτικού θαλάμου

Η μεταλλική πλάκα είναι τοποθετημένη σε απόσταση 70 cm από το έδαφος και είναι γειωμένη σε κοινό σημείο με τη γείωση της γεννήτριας. Η γείωση της μεταλλικής πλάκας έχει μεγάλη σημασία στη διεξαγωγή του πειράματος, γιατί παρέχει ασφάλεια στον χρήστη της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων. Για το λόγο αυτό είναι ένα από τα σημεία που πρέπει να ελέγχονται συνεχώς και σχολαστικά πριν τη διεξαγωγή των μετρήσεων. Στην ακόλουθη εικόνα παρουσιάζεται η γείωση της μεταλλικής πλάκας.



Εικόνα 4.2: Η γείωση της μεταλλικής πλάκας

### 4.3.1 Γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων (ESD generators)

Οι ηλεκτροστατικές εκκενώσεις πραγματοποιήθηκαν με δυο γεννήτριες της εταιρείας Schaffner την NSG-433 [22] και την NSG-438 [23]. Παρακάτω παρουσιάζονται τα κυριότερα χαρακτηριστικά κάθε μιας από αυτές.

#### 4.3.1.1 Γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων NSG-433

Η γεννήτρια NSG-433 η οποία φαίνεται στην Εικόνα 4.2 παράγει ηλεκτροστατικές εκκενώσεις της τάξης των  $\pm 18$  kV με χρόνο ανόδου μικρότερο από 1 ns. Ο διακόπτης αλλαγής πολικότητας βρίσκεται ενσωματωμένος πάνω στο πιστόλι μαζί με ψηφιακό βολτόμετρο το οποίο δείχνει την τάση εκφόρτισης.



Εικόνα 4.3: Η γεννήτρια NSG-433

Οι ηλεκτροστατικές εκκενώσεις συνήθως επηρεάζονται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες όπως πίεση, υγρασία και θερμοκρασία καθώς επίσης και από το μέγεθος του ηλεκτροδίου εκφόρτισης. Η NSG-433 χρησιμοποιεί μια συσκευή η οποία ονομάζεται προσαρμοστής εκφόρτισης επαφής (Contact Discharge Adapter) και απαλλάσσει τον παλμό από τις ανεπιθύμητες επιδράσεις του περιβάλλοντος. Ο προσαρμοστής εκφόρτισης επαφής καθώς και η ακίδα για την πραγματοποίηση των εκκενώσεων μέσω αέρα φαίνονται στην Εικόνα 4.4.





Εικόνα 4.4: Ακίδες για εκκενώσεις μέσω αέρα και επαφής για τη γεννήτρια NSG-433

Η γεννήτρια NSG-433 περιλαμβάνει επίσης τροφοδοτικό με ενσωματωμένο μετρητή ο οποίος παρουσιάζει τον αριθμό των εκκενώσεων που πραγματοποιούνται.

#### 4.3.1.2 Γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων NSG-438

Η γεννήτρια αυτή παράγει ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις μέχρι 30 kV και στον χειρισμό της χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή για αποφυγή ατυχήματος. Στην Εικόνα 4.5 φαίνεται η γεννήτρια και τα βασικά μέρη από τα οποία απαρτίζεται. Πρέπει να σημειωθεί ότι η οθόνη είναι οθόνη αφής οπότε οι όποιοι χειρισμοί γίνονται μέσω αυτής.



Εικόνα 4.5: Τα βασικά τμήματα της γεννήτριας NSG-438 και η μεταξύ τους συνδεσμολογία

Η γεννήτρια αποτελείται από τα ακόλουθα βασικά τμήματα:

- Τη βασική μονάδα, η οποία φαίνεται στο Σχήμα 4.6 και περιλαμβάνει την μπαταρία τροφοδοσίας, την γεννήτρια και τον ρυθμιστή υψηλής τάσης, καθώς και ορισμένες διατάξεις ασφαλείας. Περιλαμβάνει επίσης 3 μπουτόν (Power On, Interlock reset, Emergency Power Off) και 4 λυχνίες (Power, Battery, High Voltage, Interlock)
- Το «πιστόλι» στο οποίο βρίσκονται η ακίδα εκφόρτισης (αέρος ή επαφής), ηλεκτρονικά στοιχεία μέτρησης και η οθόνη αφής / εισαγωγής δεδομένων και το καλώδιο γείωσης. Στην λαβή του πιστολιού βρίσκεται το μπουτόν το οποίο παράγει τις ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις.
- Το DC τροφοδοτικό (CPW1027) το οποίο έχει σαν είσοδο του 100-250 Vac, 50-60 Hz, 1 A και δίνει στην βασική μονάδα 24 Vdc, 2,3 A.



Εικόνα 4.6: Η βασική μονάδα της γεννήτριας με τα μπουτόν και τις ενδεικτικές λυχνίες

Όταν η γεννήτρια είναι έτοιμη για λειτουργία στην οθόνη αφής εμφανίζεται το μενού που φαίνεται στην Εικόνα 4.7. Από την οθόνη αφής μπορούμε να επιλέξουμε την πολικότητα και την τιμή της τάσης εκφόρτισης που θέλουμε να κάνουμε, καθώς και τη λειτουργία της γεννήτριας σε θετική ή αρνητική πολικότητα (+ ή -). Επίσης προσέχουμε η ένδειξη στην οθόνη να δείχνει τη μορφή της εκφόρτισης που θα πραγματοποιήσουμε. Αν θέλουμε να κάνουμε εκφορτίσεις επαφής και στην οθόνη υπάρχει το σύμβολο εκφόρτισης μέσω αέρα τότε από το Menu Settings επιλέγουμε διαδοχικά Discharge και Contact.



Εικόνα 4.7: Το μενού στην οθόνη αφής της NSG-438

Στον Πίνακα 4.1 φαίνονται τα συγκεντρωτικά τεχνικά χαρακτηριστικά των δυο γεννητριών ηλεκτροστατικής εκφόρτισης NSG-433 και NSG-438 που χρησιμοποιήσαμε κατά την διάρκεια διεξαγωγής των πειραμάτων.

	NSG-433	NSG-438
Πυκνωτής εκκένωσης $C_s$	150 pF $\pm$ 10%	150 pF
Αντίσταση εκκένωσης $R_d$	330 $\Omega$ $\pm$ 10%	330 $\Omega$
Αντίσταση φόρτισης $R_c$	100 M $\Omega$	50 M $\Omega$
Τάση εξόδου $V_0$	2-18 kV για εκφορτίσεις	200V-30 kV για
Πολικότητα τάσης εξόδου	Θετική/αρνητική	Θετική/αρνητική
Χρόνος κρατήματος απλής φόρτισης (90% $V_0$ )	>5 sec	>5 sec
Χρόνος ανόδου ρεύματος εκφόρτισης ( $t_r$ )	< 1 ns για εκφορτίσεις στον αέρα και για τάσεις $\leq$ 8 kV	< 1 ns για εκφορτίσεις στον αέρα και για
Μέγιστο ρεύματος ( $\pm$ 30%)	2 kV: 7,5A $\pm$ 10% 4 kV: 15A $\pm$ 10%	
Τάση τροφοδοσίας	100/120/220/240 VAC, 50-60 Hz	100/120/220/240 VAC, 50-60 Hz
Κατανάλωση	25 VA	25 VA
Θερμοκρασία λειτουργίας	5-40 $^{\circ}$ C	5-40 $^{\circ}$ C
Υγρασία λειτουργίας	20%-80%	20%-80%
Μέγιστη ενέργεια εκφόρτισης	24 mJ	

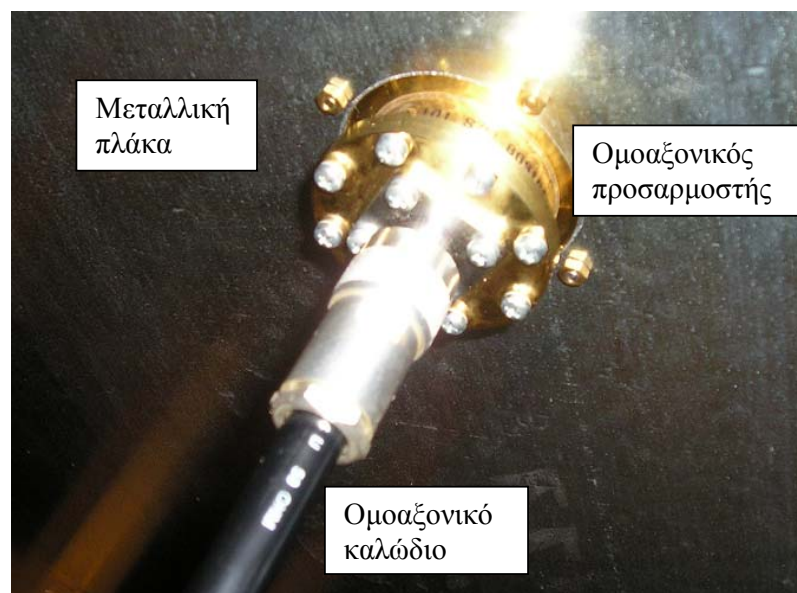
Πίνακας 4.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων

### 4.3.2 Ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης

Ο ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης [11] δεν είναι τίποτε άλλο παρά ένας μετατροπέας ρεύματος (current transducer) με τη βοήθεια του οποίου μπορούμε να μετρήσουμε το εκχυόμενο ρεύμα από την ηλεκτροστατική εκφόρτιση. Είναι γνωστός και σαν Pellegrini target. Στη διάταξη θα χρησιμοποιήθηκε ο MD 101 της Schaffner. Στην Εικόνα 4.8 παρουσιάζουμε τον ομοαξονικό προσαρμοστή που χρησιμοποιήσαμε και στην Εικόνα 4.9 τον ομοαξονικό προσαρμοστή τοποθετημένο στη διάταξη.



Εικόνα 4.8: Ο ομοαξονικός προσαρμοστής MD 101



Εικόνα 4.9: Ο ομοαξονικός προσαρμοστής τοποθετημένος στη διάταξη

### 4.3.3 Ομοαξονικά καλώδια υψηλής συχνότητας

Το φαινόμενο της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης διαρκεί μερικά ns. Συνεπώς το εύρος των συχνοτήτων που καλύπτει είναι της τάξης των GHz. Για αυτό το λόγο απαιτείται τα ομοαξονικά καλώδια που θα χρησιμοποιηθούν να είναι κατάλληλα για μεταφορά σήματος υψηλής συχνότητας (RF, Radio Frequency). Από τα τέσσερα ομοαξονικά καλώδια που χρησιμοποιήθηκαν ένα καλώδιο συνδέει τον ομοαξονικό προσαρμοστή μέτρησης με το βύσμα στην εσωτερική μεριά του μεταλλικού τοίχου του ανηχοϊκού θαλάμου και ένα άλλο το βύσμα στην εξωτερική μεριά του μεταλλικού τοίχου με κάποιο κανάλι του παλμογράφου. Τα υπόλοιπα δυο χρησιμοποιήθηκαν για τη μέτρηση του ηλεκτρικού πεδίου με ανάλογο τρόπο, έτσι ώστε ένα καλώδιο να συνδέει το probe με ένα όμοιο με το παραπάνω βύσμα στην εσωτερική μεριά του μεταλλικού τοίχου του ανηχοϊκού θαλάμου και ένα άλλο το βύσμα στην εξωτερική μεριά του μεταλλικού τοίχου με κάποιο άλλο κανάλι του παλμογράφου.

### 4.3.4 Εξασθενητής (attenuator)

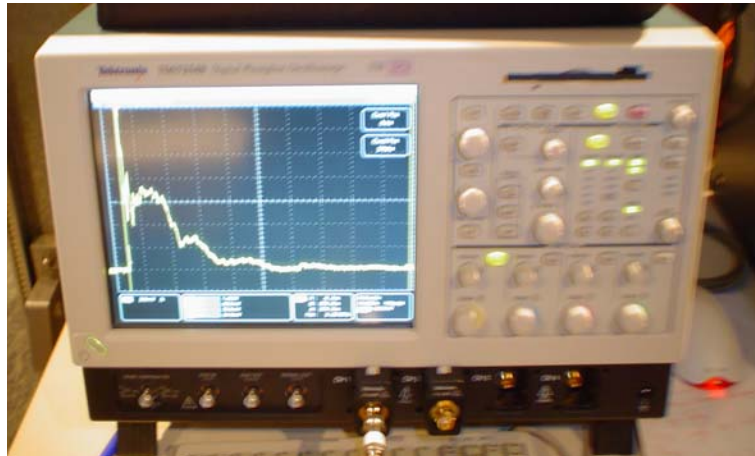
Προκειμένου να μετρήσουμε το ρεύμα της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης και να πάρουμε την κυματομορφή του το σήμα πρέπει να εξασθενήσει, ώστε να μην κινδυνέψει να καταστραφεί το κανάλι του παλμογράφου από μεγάλη ένταση ρεύματος. Γι' αυτόν το λόγο χρησιμοποιείται ο εξασθενητής (attenuator) 011-0059-03 της Tektronix με εύρος ζώνης από dc έως 2 GHz, με εξασθένηση 20 dB και αντίσταση 50 Ω. Ο εξασθενητής τοποθετείται μεταξύ του ομοαξονικού καλωδίου και του καναλιού του παλμογράφου. Εξασθένηση 20 dB σημαίνει υποβίβαση του σήματος 10 φορές, εφ' όσον κατά τα γνωστά ισχύει  $20dB = 20 \log\left(\frac{U_2}{U_1}\right)$ . Ο εν λόγω εξασθενητής φαίνεται στην Εικόνα 4.10 που ακολουθεί:



Εικόνα 4.10: Ο εξασθενητής (attenuator) 011-0059-03

### 4.3.5 Παλμογράφος Tektronix TDS 7254B

Ο παλμογράφος αυτός, που είναι ένα από τα σύγχρονα μοντέλα της Tektronix, λειτουργεί στα 2,5 GHz καλύπτοντας τις απαιτήσεις του ταχέως μεταβατικού φαινομένου της ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, όπως άλλωστε ορίζει και το Πρότυπο EN 61000-4-2 για παλμογράφο τουλάχιστον 1 GHz. Διαθέτει 4 κανάλια, ενσωματωμένο επεξεργαστή Pentium IV, λειτουργικό σύστημα Windows 2000, οθόνη με ανάλυση 1024 x 768, 3,5 floppy για δισκέτα και CD Recorder για την αποθήκευση των μετρήσεων. Ο TDS 7254S παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.11, τα κομβία χειρισμού του στην Εικόνα 4.12, ενώ μερικά από τα χαρακτηριστικά του φαίνονται στον πίνακα 4.2 που ακολουθεί:



Εικόνα 4.11: Ο παλμογράφος Tektronix TDS 7254B



Εικόνα 4.12: Κομβία χειρισμού του παλμογράφου Tektronix TDS 7254B

Κανάλια Εισόδου	4
Εύρος ζώνης	2,5 GHz
Χρόνος ανόδου από το 10% στο 90%	130 ps
Χρόνος ανόδου από το 20% στο 80%	83 ps
Ακρίβεια DC κέρδους	$\pm 2\% + (2\% \times \text{offset})$
Σύζευξη εισόδου	DC, GND
Αντίσταση εισόδου	$50\Omega \pm 2,5\%$
Ευαισθησία εισόδου στα 50 Ω	2 mV/div έως 1 V/div
Κάθετη ανάλυση	8 bit
Μέγιστη τάση εισόδου, 50 Ω	$<1 V_{\text{RMS}}$ για $r < 100 \text{ mV/div}$ , $<5 V_{\text{RMS}}$ για $r \geq 100 \text{ mV/div}$
Μέγιστη ταχύτητα δειγματοληψίας Ch1	20 Gs/sec
Μέγιστη ταχύτητα δειγματοληψίας Ch2	10 Gs/sec
Μέγιστη ταχύτητα δειγματοληψίας Ch3	5 Gs/sec
Μέγιστη ταχύτητα δειγματοληψίας Ch4	1 Gs/sec

Πίνακας 4.2: Χαρακτηριστικά Παλμογράφου TDS 7254B

Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στο γεγονός ότι το κάθε κανάλι του παλμογράφου αντέχει μέγιστη τιμή ρεύματος μέχρι 5 V (rms τιμή) οπότε πρέπει να είμαστε ιδιαίτερα προσεχτικοί και να χρησιμοποιείται πάντα ο εξασθενητής.

#### 4.3.6 Αισθητήρας για μέτρηση της έντασης E του ηλεκτρικού πεδίου

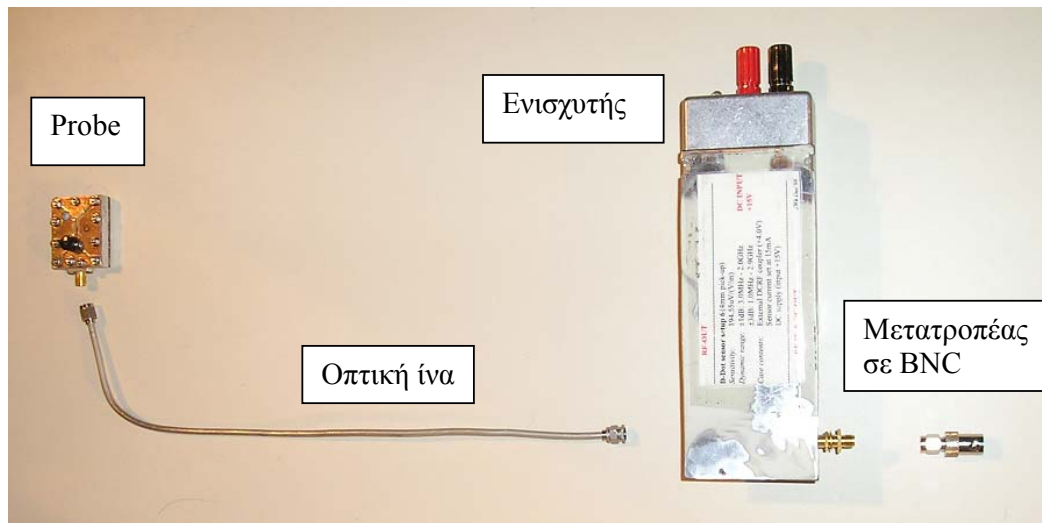
Για τη μέτρηση του ηλεκτρικού πεδίου χρησιμοποιήσαμε τον probe κατασκευής του καθηγητή Ηλεκτρομαγνητικής Συμβατότητας του Πανεπιστημίου του Missouri-Rolla, David Pommerenke, το οποίο και παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.13



Εικόνα 4.13: Το probe για τη μέτρηση της έντασης E του ηλεκτρικού πεδίου

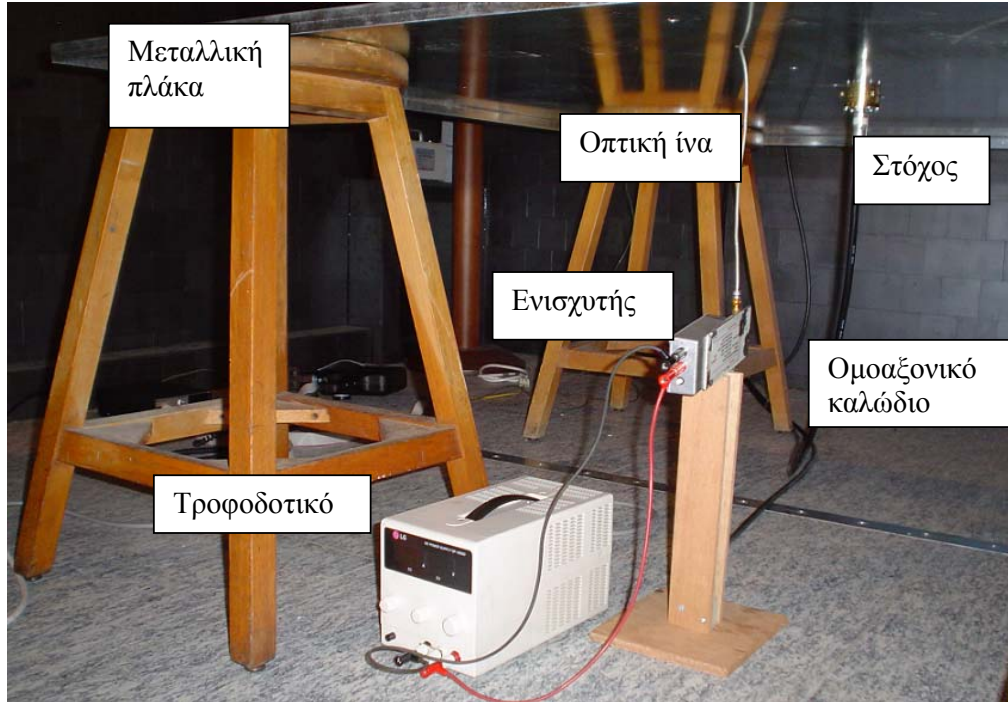
Το σασί του probe είναι ορθογωνίου σχήματος αλουμινένιο πλαίσιο με μεταλλική πλάκα να κλείνει το κάτω μέρος. Οι διαστάσεις του είναι  $3,9 \times 0,9 \times 3,1 \text{ cm}^3$  ([μήκος] x [ύψος] x [πλάτος]). Ο αισθητήρας του ηλεκτρικού πεδίου δεν έχει την τάση να λαμβάνει μαγνητικά πεδία και για το λόγο αυτό δεν χρειάζεται ασπίδα προστασίας γύρω από τον αισθητήρα. Το παραπάνω probe χρησιμοποιείται για τη μέτρηση του ηλεκτρικού πεδίου για σήματα έως 2GHz και περιλαμβάνει εσωτερικό ενισχυτή τύπου ERA-5-SM, η παρουσία του οποίου εξασφαλίζει προσαρμογή στον εξοπλισμό μέτρησης ( $50\Omega$  του παλμογράφου).

Το σήμα εξόδου του αισθητήρα είναι αρκετά μεγάλο ώστε να μετρηθεί με παλμογράφο, ωστόσο ένας εξωτερικός ενισχυτής μπορεί να προστεθεί για μεγαλύτερη ενίσχυση σήματος. Ο ενισχυτής συνδέεται με την έξοδο του probe μέσω οπτικής ίνας για ακριβέστερη μεταφορά του σήματος και τροφοδοτείται μέσω του τροφοδοτικού LG GP-4303D με συνεχή τάση 15 V. Η έξοδος του οδηγείται μέσω ομοαξονικού καλωδίου υψηλής συχνότητας το οποίο μεταφέρει το σήμα του ηλεκτρικού πεδίου στον παλμογράφο. Στις Εικόνες 4.14 και 4.15 φαίνεται η συνδεσμολογία που μόλις περιγράφηκε πριν και μετά τη σύνδεσή της στην πειραματική διάταξη, αντίστοιχα.



Εικόνα 4.14: Probe και probe driver πριν τη σύνδεση στη διάταξη





Εικόνα 4.15: Probe και probe driver μετά τη σύνδεση στη διάταξη

Στο σημείο αυτό αξίζει να υπογραμμιστεί πως τόσο στο Κανάλι 1 (Ch 1) του παλμογράφου, όπου μέσω του ομοαξονικού καλωδίου καταλήγει το σήμα του ρεύματος εκφόρτισης, όσο και στο Κανάλι 2 (Ch 2), όπου καταλήγει το σήμα του ηλεκτρικού πεδίου μέσω της διάταξης του probe, χρησιμοποιούνται εξασθενητές, καθώς διατρέχεται κίνδυνος καταστροφής τους από το μέγεθος του πεδίου. Αυτό παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.16 που ακολουθεί.



Εικόνα 4.16: Κανάλι ρεύματος με εξασθενητή – Κανάλι πεδίου με εξασθενητή

### 4.3.7 Τροφοδοτικό LG GP 4303D

Προκειμένου να λειτουργήσει ο αισθητήρας μέτρησης μαγνητικού πεδίου κατασκευής του David Pommerenke, απαιτείται η χρήση τροφοδοτικού. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε από τον εξοπλισμό του εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων το GP4303D της LG, το οποίο παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.17.



Εικόνα 4.17: Το τροφοδοτικό.

Προνομαστισμός λειτουργιών	Αιτιώματoς
Μέγιστη ισχύς εξόδου	90 W
Μέγιστο ρεύμα εξόδου	30 A (για τάση 0 – 30 V)
Πολλαπλές επιλογές μονάδας	Παράλληλα ή σε σειρά
Προστασία από υπερένταση	Ναι
Προστασία από υπερθέρμανση	Όχι

Πίνακας 4.3: Χαρακτηριστικά Τροφοδοτικού LG GP 4303D

Τα ονομαστικά μεγέθη λειτουργίας του είναι 30 V, 3 A και 90 W, όσον αφορά την ονομαστική τάση, το ονομαστικό ρεύμα και την ονομαστική ισχύ. Στον Πίνακα 4.3 παρατίθενται ορισμένα από τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του τροφοδοτικού.

### 4.3.8 Θωρακισμένος θάλαμος (transient immunity room)

Προκειμένου να εξαλείψουμε τις παρεμβολές που προκαλεί η ηλεκτροστατική εκφόρτιση στον εξοπλισμό καταγραφής (παλμογράφος), χρησιμοποιείται θωρακισμένος θάλαμος μεταβατικών διαταραχών. Ο παλμογράφος βρίσκεται στο θάλαμο ελέγχου (control room) διαστάσεων 3,2 x 2,5 x 3,3 m<sup>3</sup>. Ο θωρακισμένος θάλαμος του εργαστηρίου που θα χρησιμοποιηθεί στην πειραματική διάταξη είναι ο Lindgren-Rayproof Series 81. Ο θάλαμος αυτός έχει διαστάσεις 3,5 x 6,5 x 3,3 m<sup>3</sup>, τα τοιχώματά του οποίου είναι κατασκευασμένα από φερρίτη (μαλακός σίδηρος),

υλικό το οποίο έχει την ιδιότητα να απορροφά σε εξαιρετικά μεγάλο βαθμό τις παραγόμενες ηλεκτρομαγνητικές διαταραχές (EMI- Electromagnetic Interferences). Ο θάλαμος αυτός αποκόπτει συχνότητες ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων έως και 1 GHz.

#### 4.3.9 Εποπτική παρουσίαση της πειραματικής διάταξης

Στην Εικόνα 4.17 παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη κατά τη διάρκεια εκφόρτισης. Διακρίνεται η γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων NSG-433, ο ομοαξονικός προσαρμοστής μέτρησης βιδωμένος στη γειωμένη μεταλλική πλάκα και το probe για τη μέτρηση της έντασης του μαγνητικού πεδίου σε σημείο της κατεύθυνσης C και σε απόσταση 20 cm από το στόχο (ομοαξονικός προσαρμοστής).



Εικόνα 4.17: Η πειραματική διάταξη κατά τη διάρκεια εκφόρτισης

# Κεφάλαιο 5

## Πειραματικά αποτελέσματα

### 5.1 Εισαγωγή

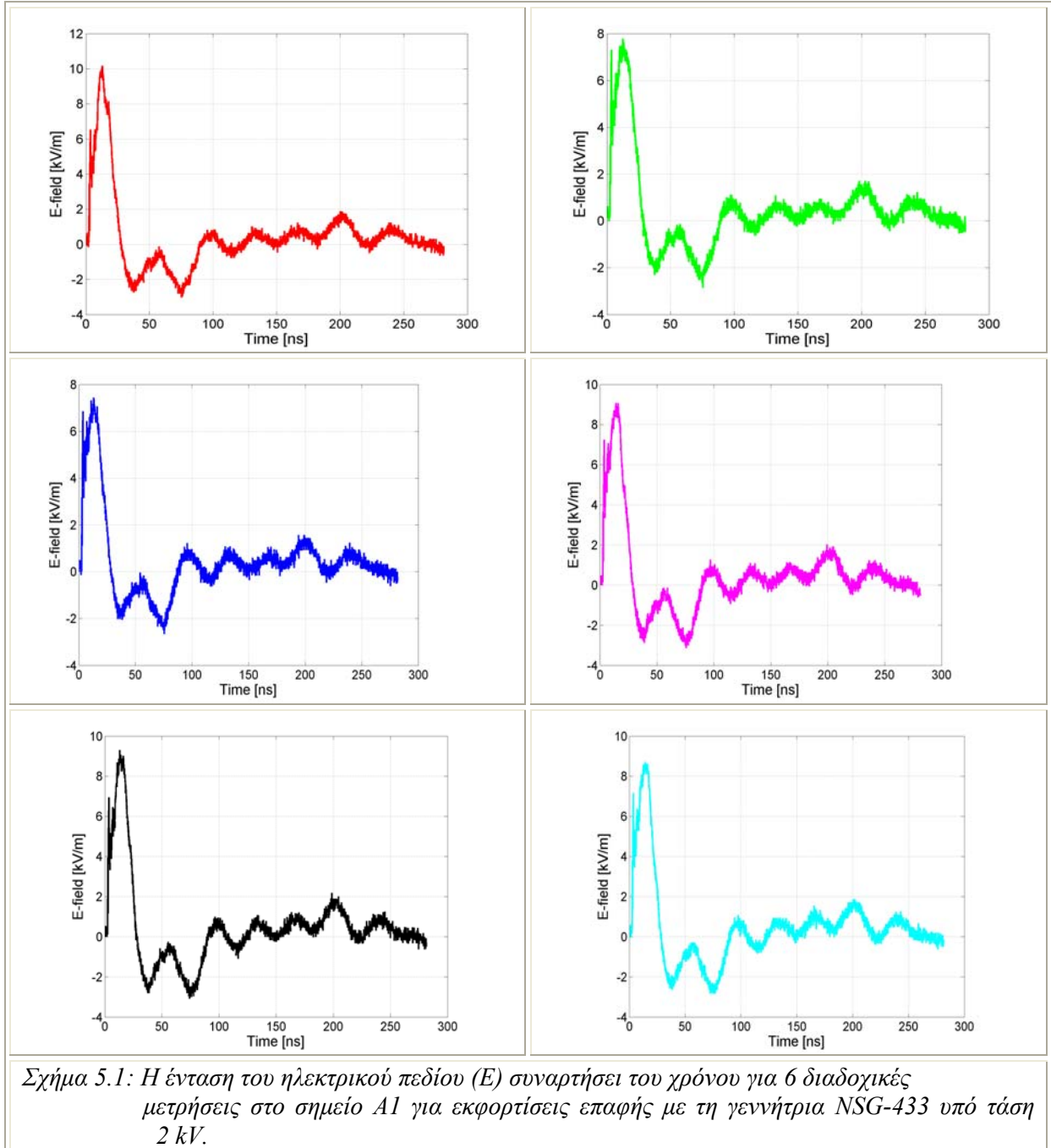
Στην πειραματική διάταξη, που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 4, πραγματοποιήθηκαν εκφορτίσεις με δύο γεννήτριες της εταιρίας Schaffner και συγκεκριμένα με τις γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων NSG-433 και NSG-438. Οι εκφορτίσεις οι οποίες πραγματοποιήθηκαν ήταν εκφορτίσεις επαφής για τάσεις  $\pm 2$  kV και  $\pm 4$  kV. Συγκεκριμένα για κάθε σημείο κάθε κατεύθυνσης σημειώθηκαν έξι ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις. Οι γραφικές παραστάσεις για την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου, όπως αυτές προέκυψαν από την επεξεργασία των μετρήσεων στο MATLAB, παρουσιάζονται παρακάτω.

### 5.2 Γραφικές παραστάσεις

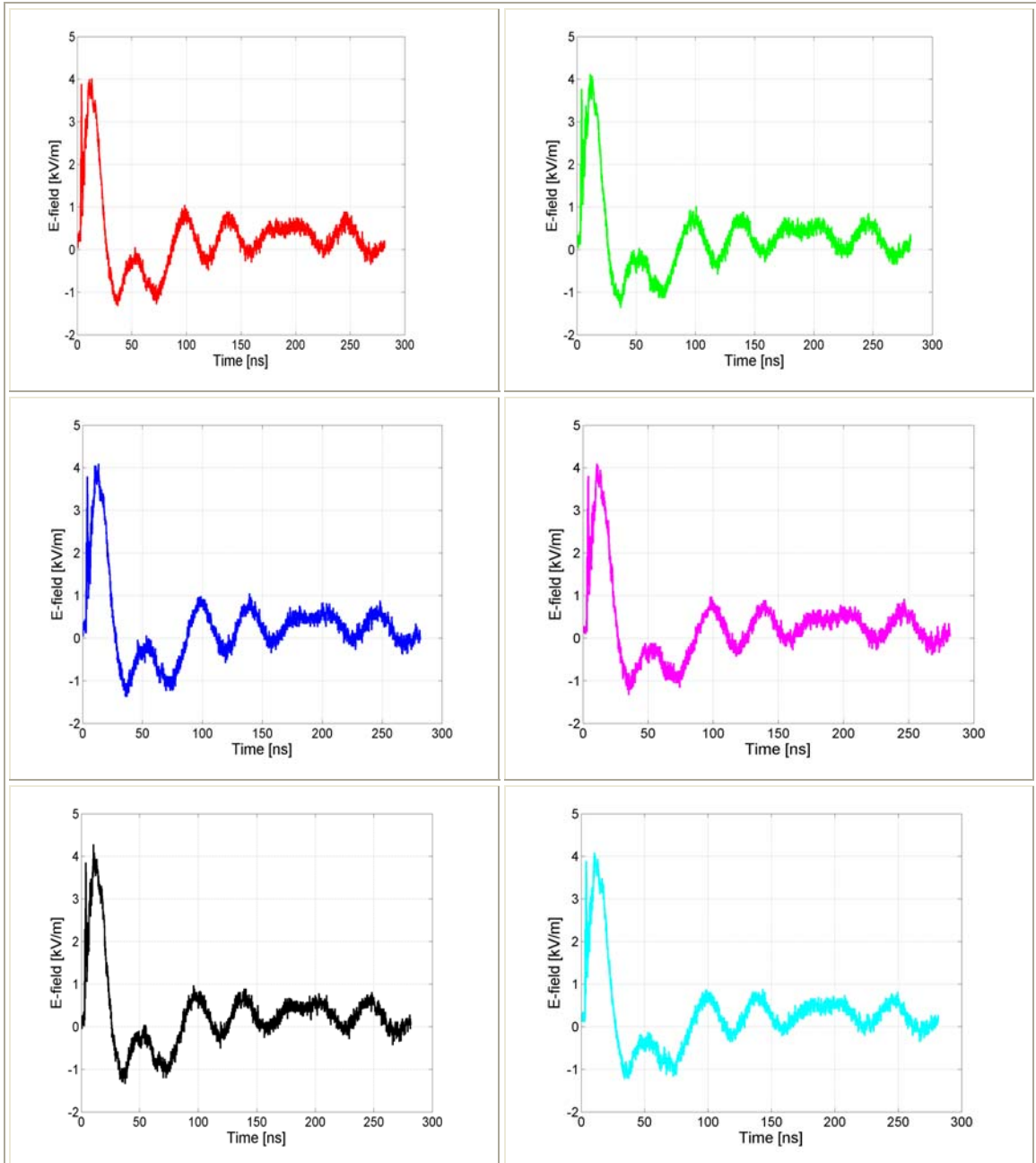
Στην παράγραφο αυτή θα παρουσιάσουμε μια σειρά από γραφήματα που αφορούν την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου σε κάθε σημείο παρατήρησης. Ο αισθητήρας για τη μέτρηση του πεδίου τοποθετήθηκε σε διαδοχικές αποστάσεις [20 cm(1), 35cm(2), 50 cm(3) και 65 cm(4)] σε τρεις κατευθύνσεις (Κατεύθυνση A, Κατεύθυνση C και Κατεύθυνση D) οι οποίες είναι κάθετες μεταξύ τους ως προς το σημείο εκφόρτισης. Οι αποστάσεις αυτές έχουν παρουσιαστεί στο Σχήμα 4.2 του Κεφαλαίου 4. Τα γραφήματα που προέκυψαν ύστερα από επεξεργασία των πειραματικών αποτελεσμάτων με το πρόγραμμα MATLAB για εκφορτίσεις επαφής για τις γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων NSG-433 και NSG-438 υπό τάσεις  $\pm 2$  kV και  $\pm 4$  kV είναι τα ακόλουθα:

### 5.2.1 Εκφορτίσεις επαφής υπό τάση 2 kV με τη γεννήτρια NSG-433

- Σημείο A1 (20 cm)

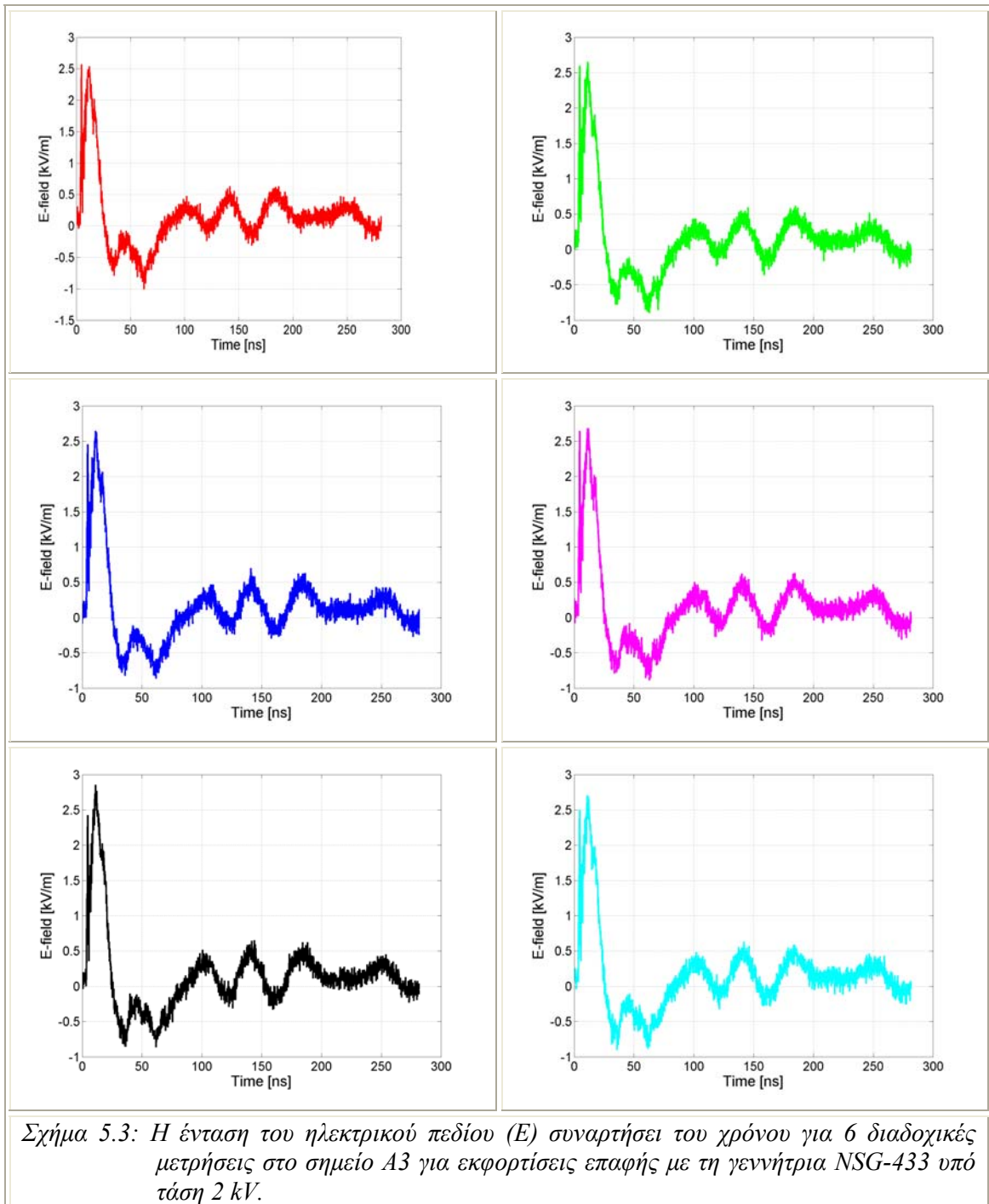


- Σημείο A2 (35 cm)



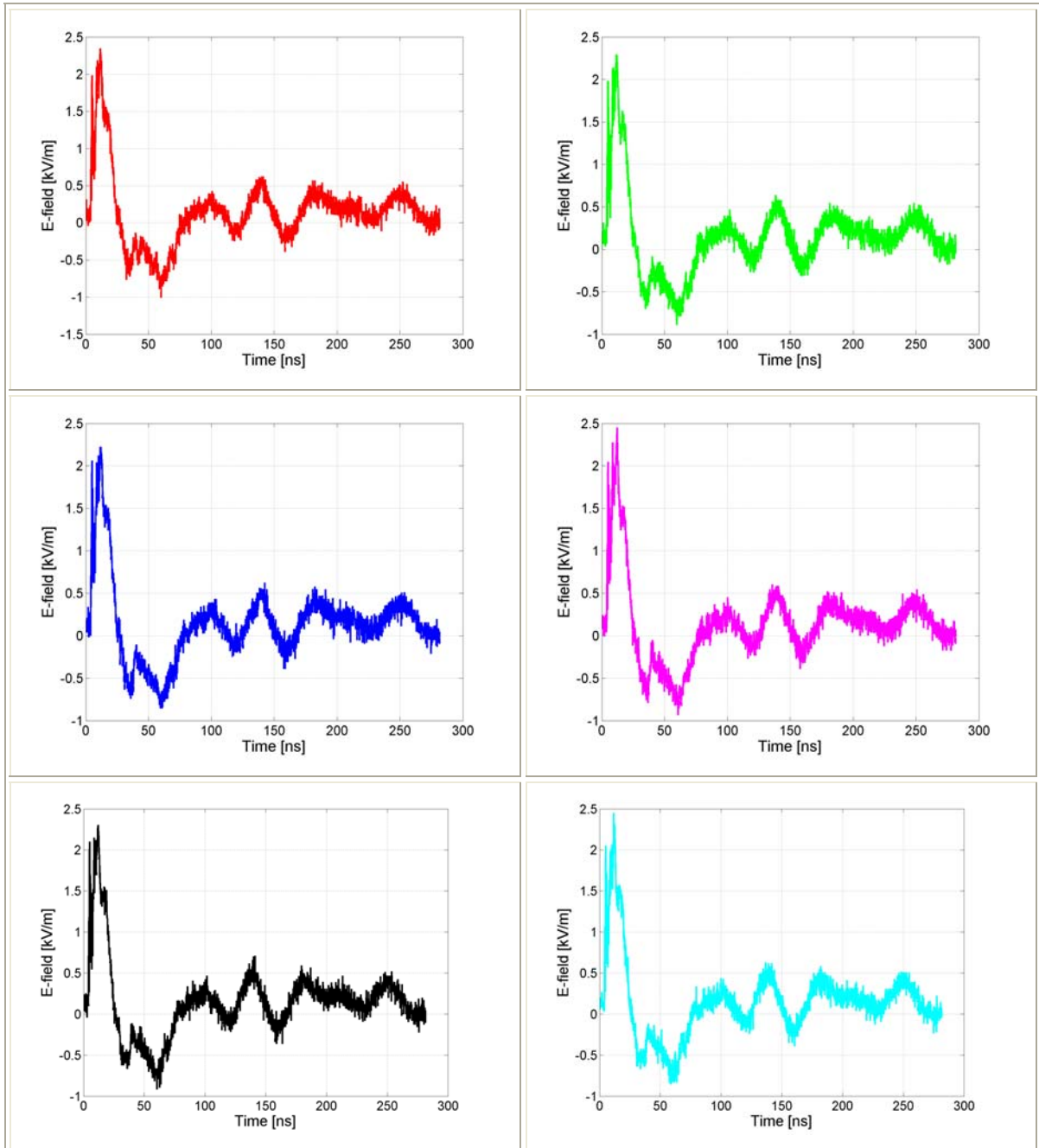
Σχήμα 5.2: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο A2 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση 2 kV.

- Σημείο A3 (50 cm)



Σχήμα 5.3: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο A3 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση 2 kV.

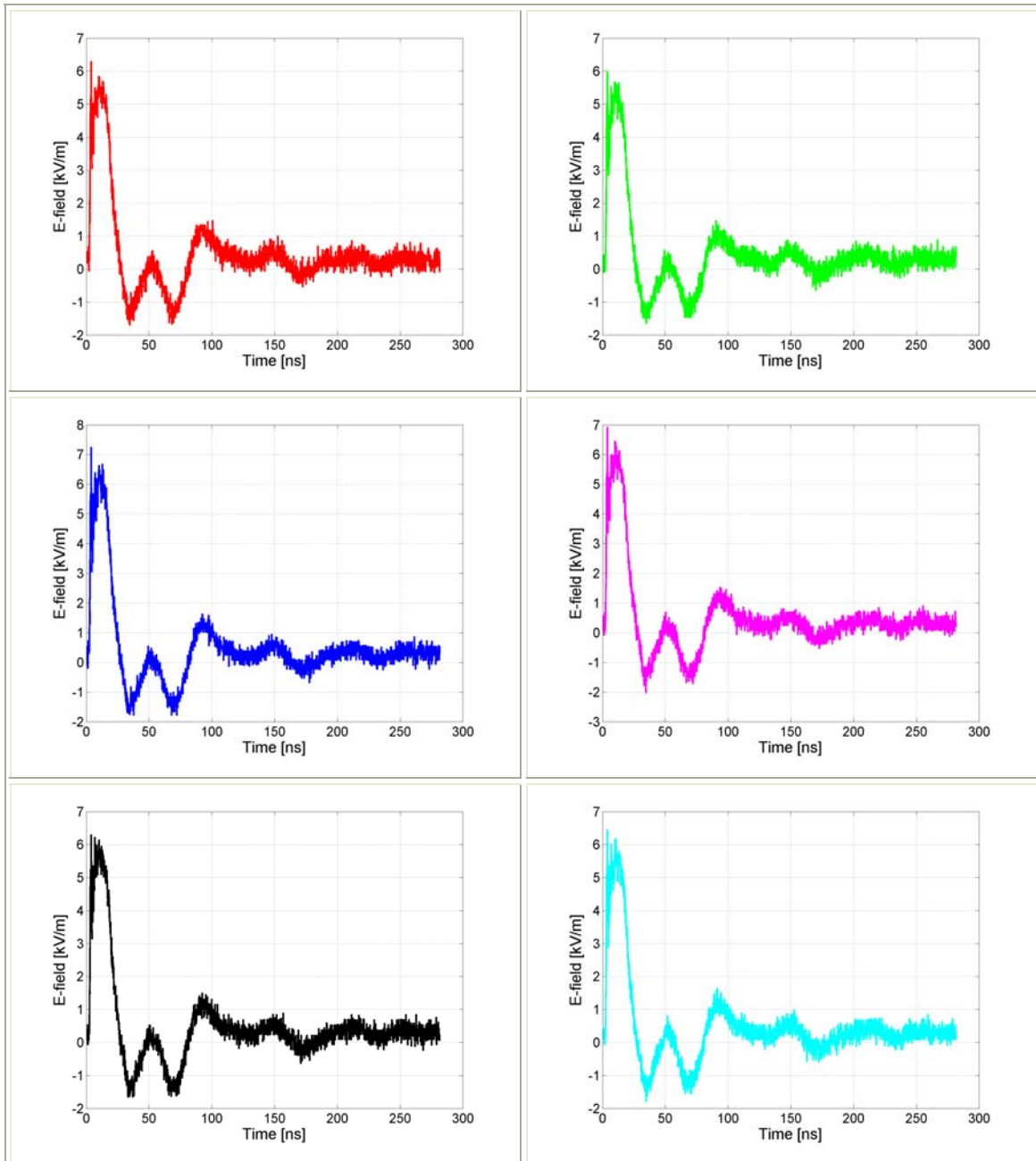
- Σημείο A4 (65 cm)



Σχήμα 5.4: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο A4 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση 2 kV.

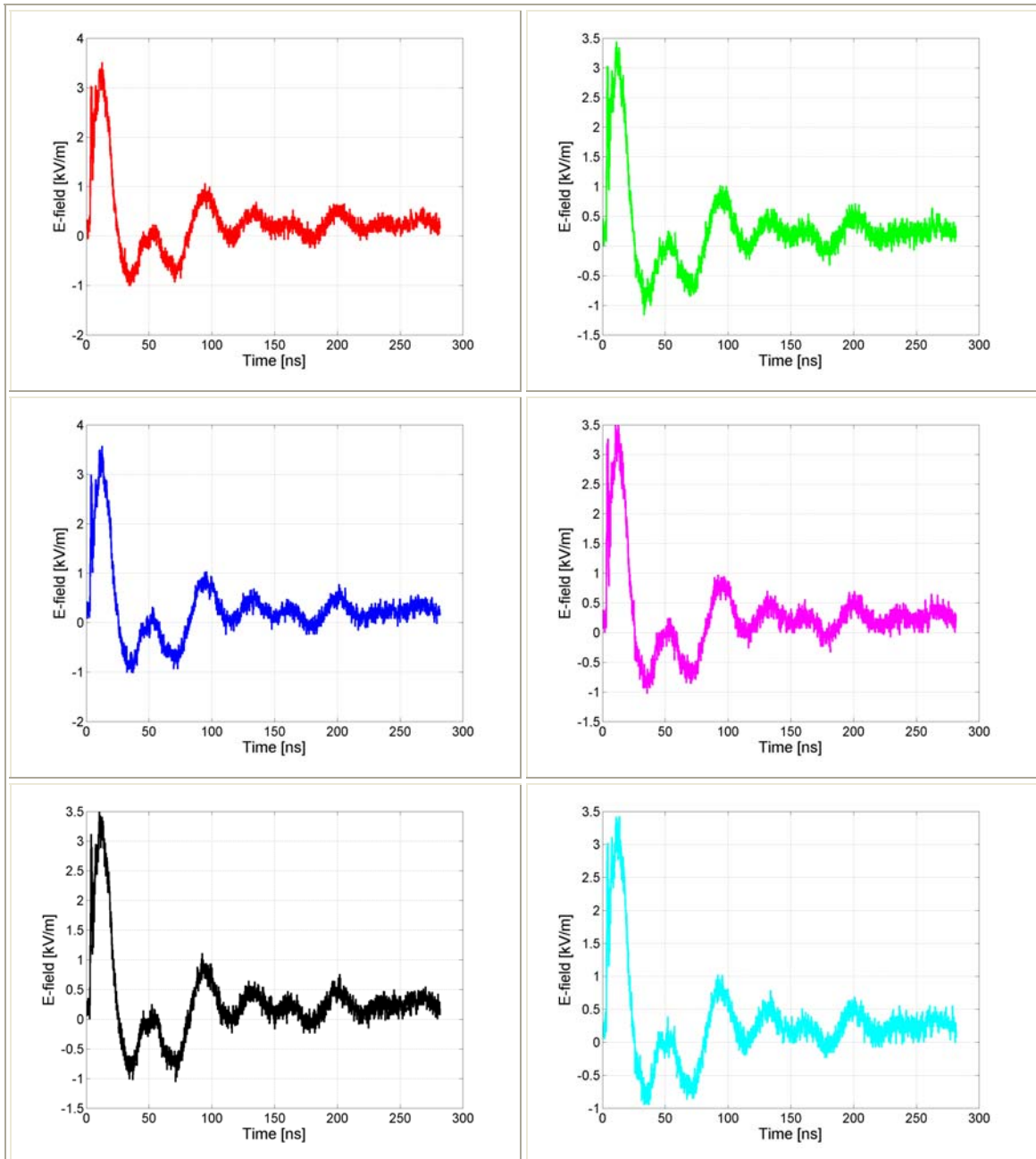


- Σημείο C1 (20 cm)



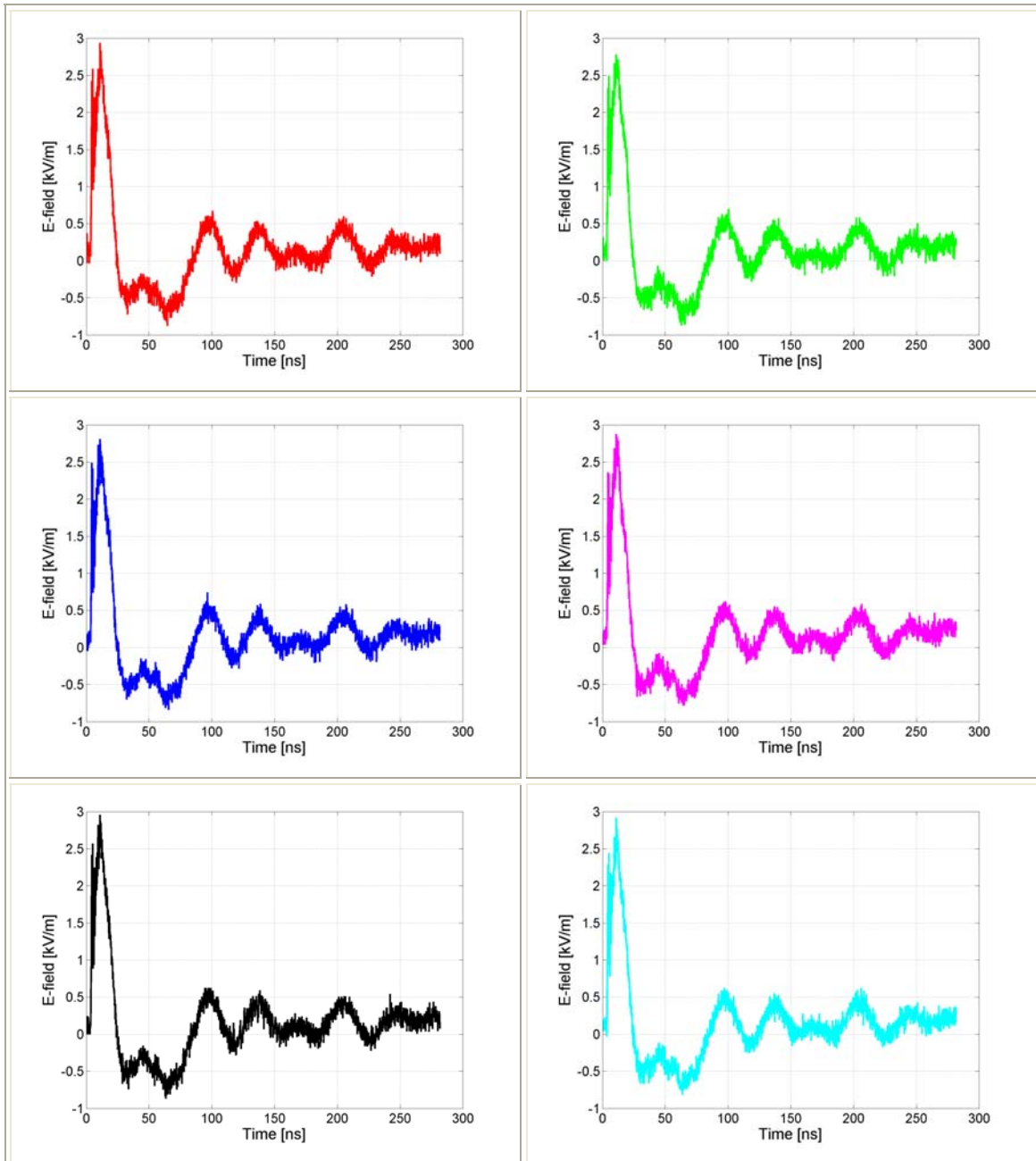
Σχήμα 5.5: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο C1 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση 2 kV.

- Σημείο C2 (35 cm)



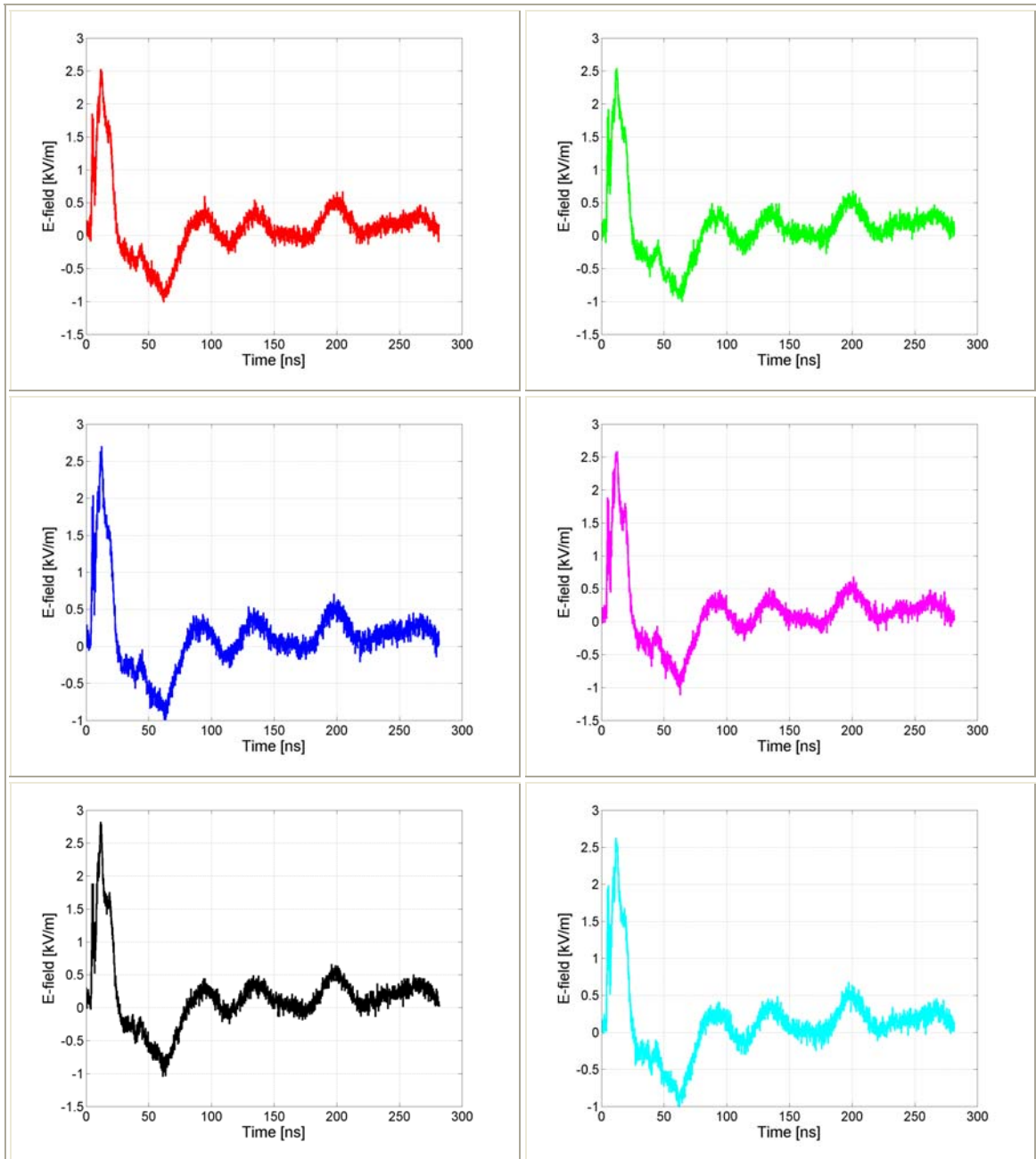
Σχήμα 5.6: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο C2 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση 2 kV.

- Σημείο C3 (50 cm)



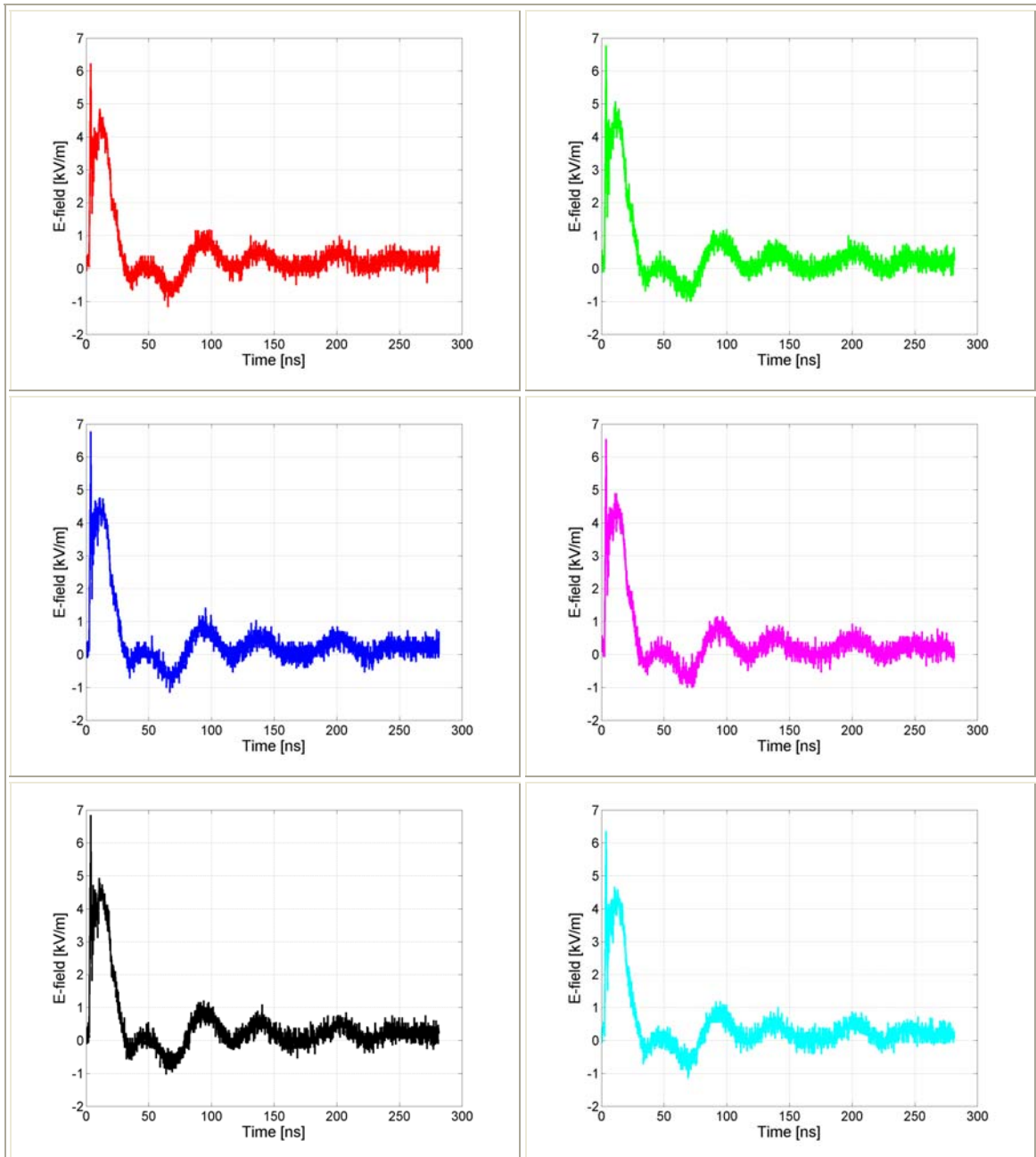
Σχήμα 5.7: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο C3 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση 2 kV.

- Σημείο C4 (65 cm)



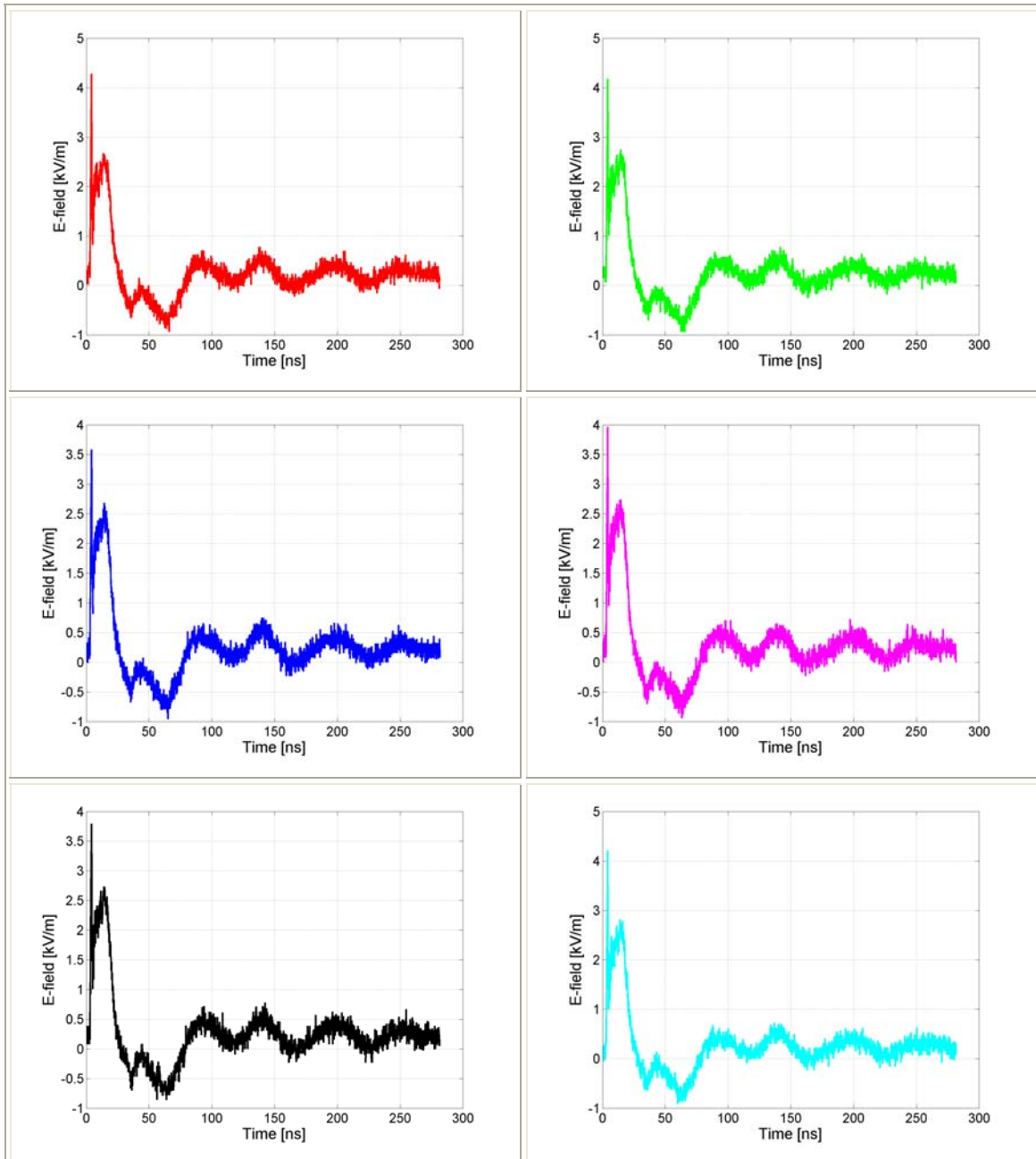
Σχήμα 5.8: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο C4 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση 2 kV.

- Σημείο D1 (20 cm)



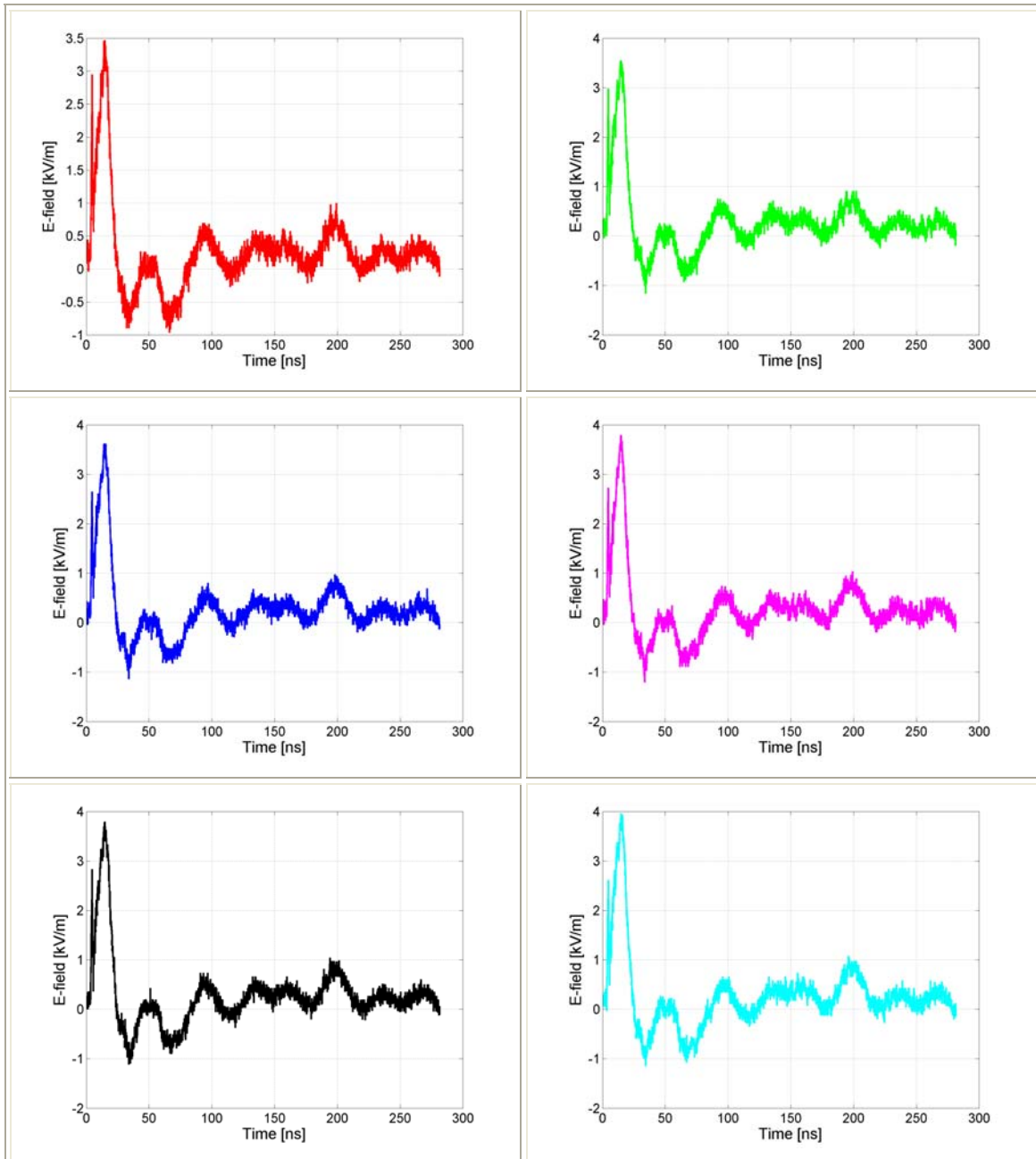
Σχήμα 5.9: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο D1 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση 2 kV.

- Σημείο D2 (35 cm)



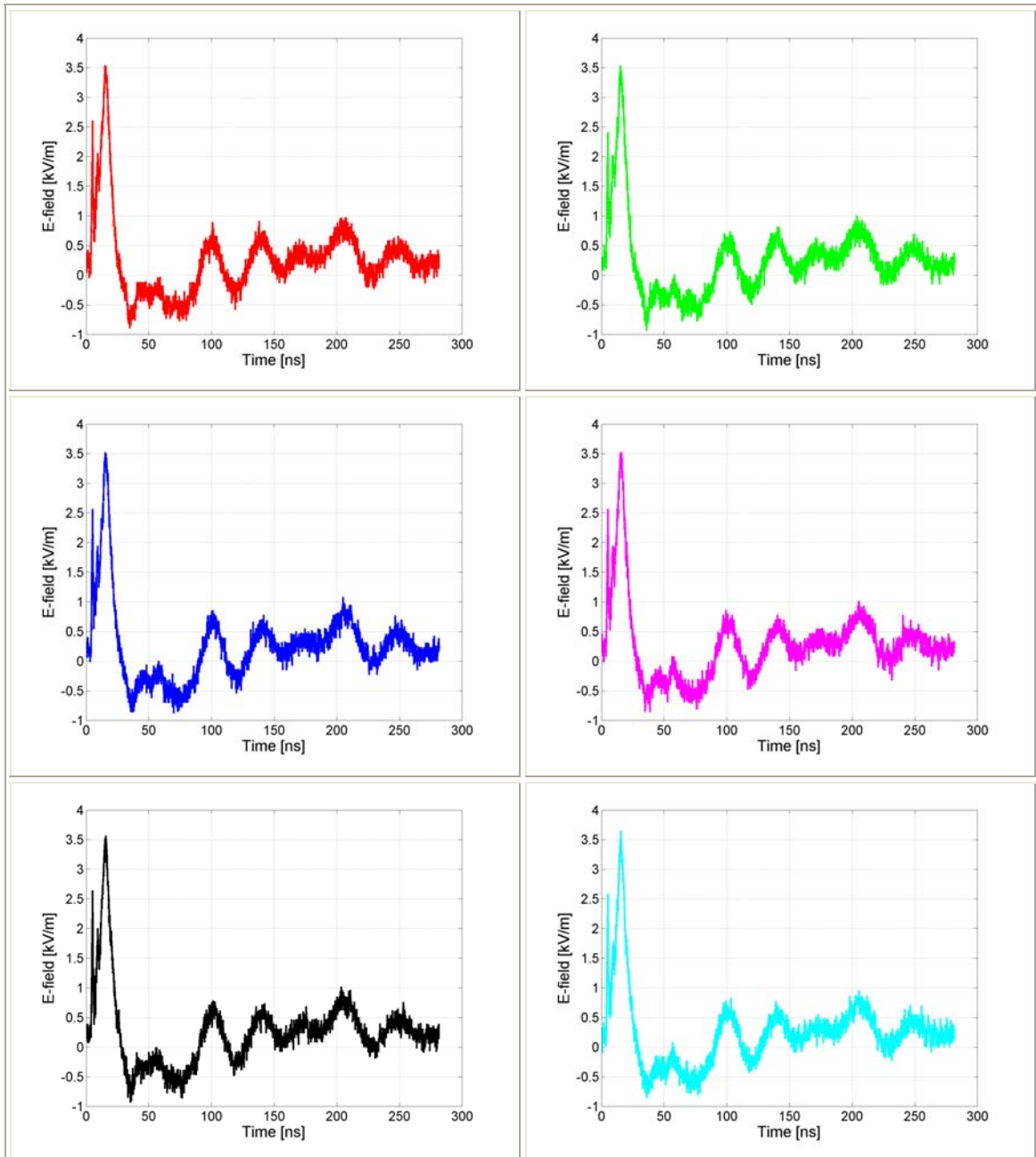
Σχήμα 5.10: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο D2 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση 2 kV.

- Σημείο D3 (50 cm)



Σχήμα 5.11: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο D3 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση 2 kV.

- Σημείο D4 (65 cm)

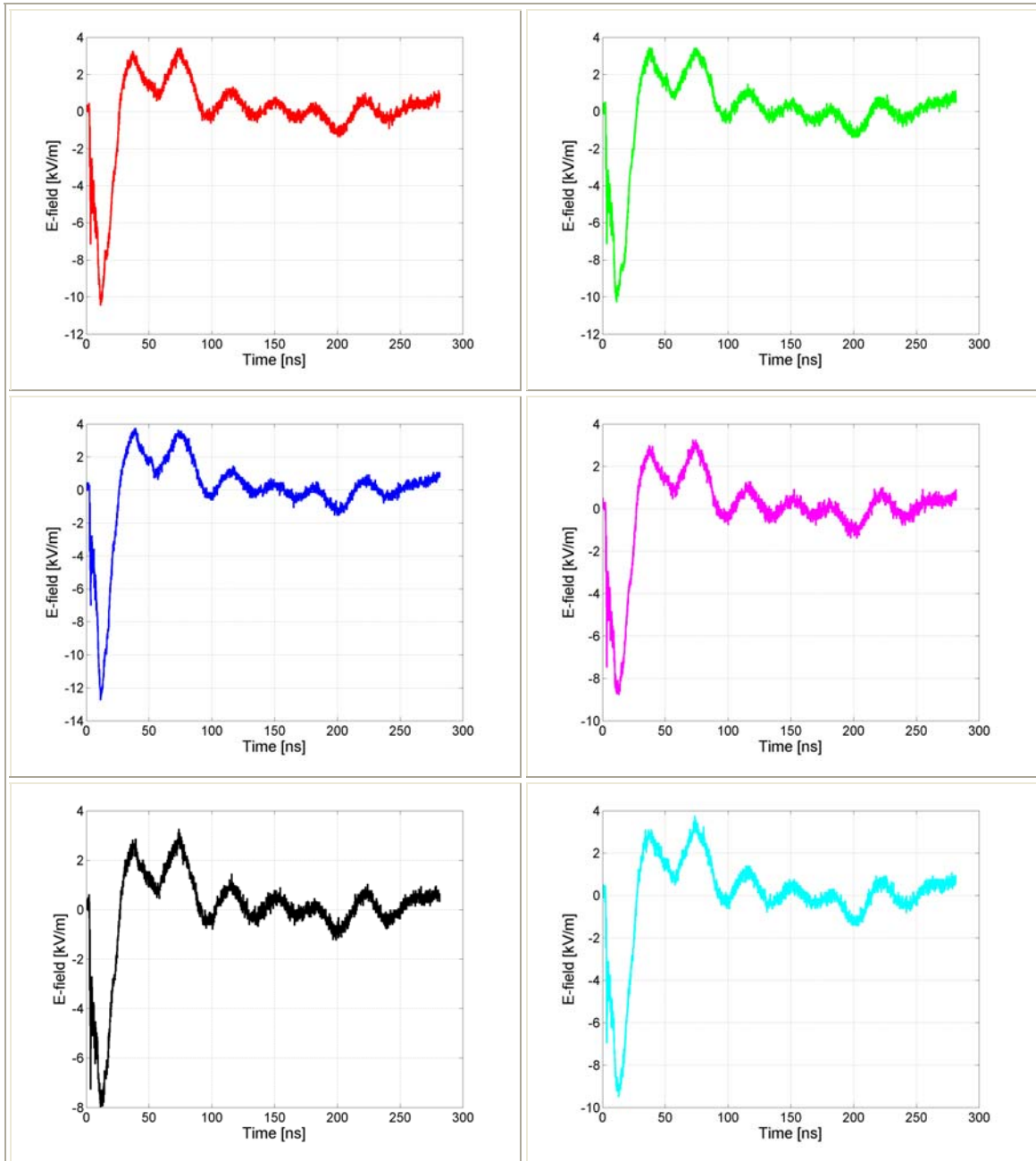


Σχήμα 5.12: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο D4 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση 2 kV.



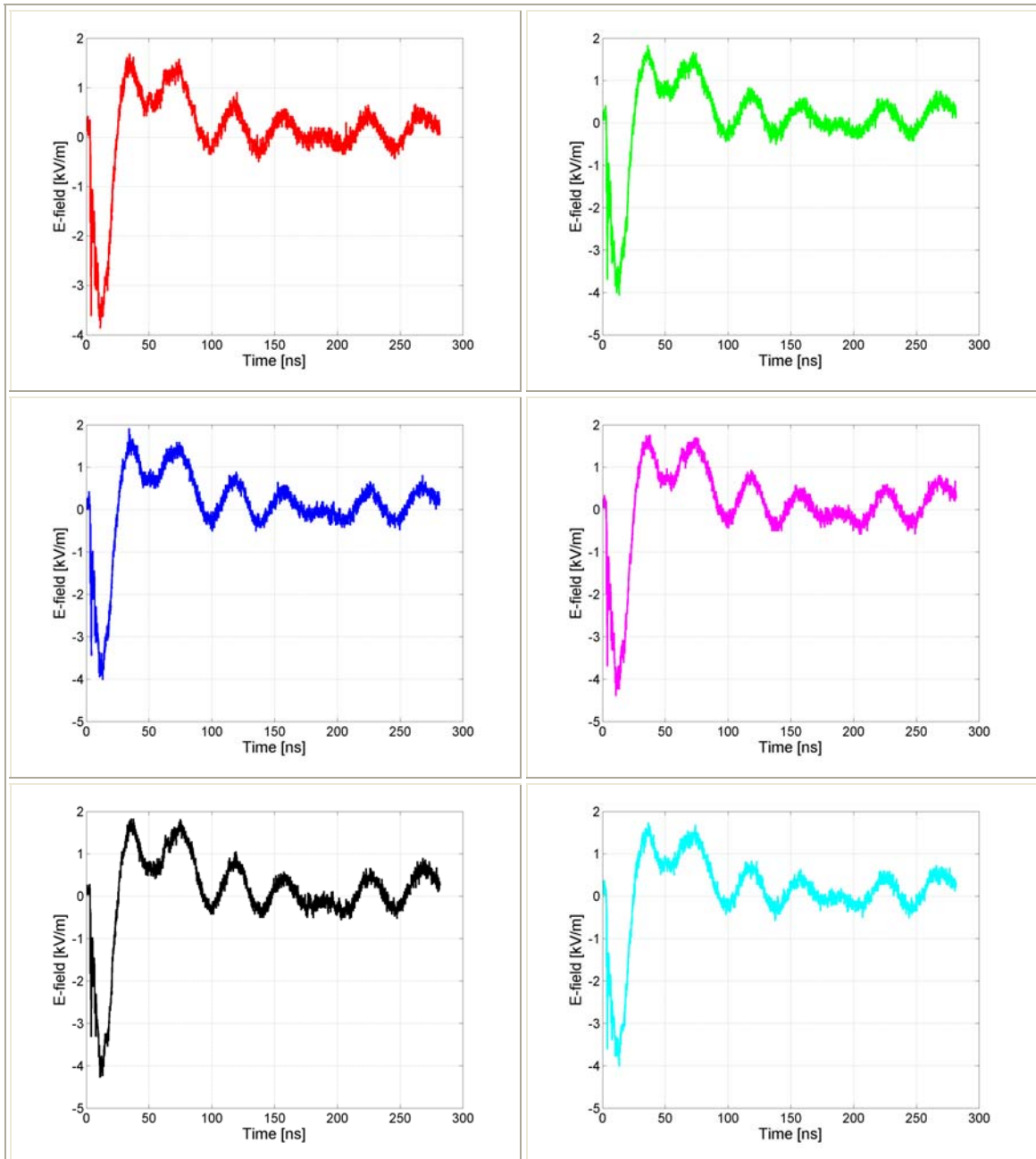
### 5.2.2 Εκφορτίσεις επαφής υπό τάση -2 kV με τη γεννήτρια NSG-433

- Σημείο A1 (20 cm)



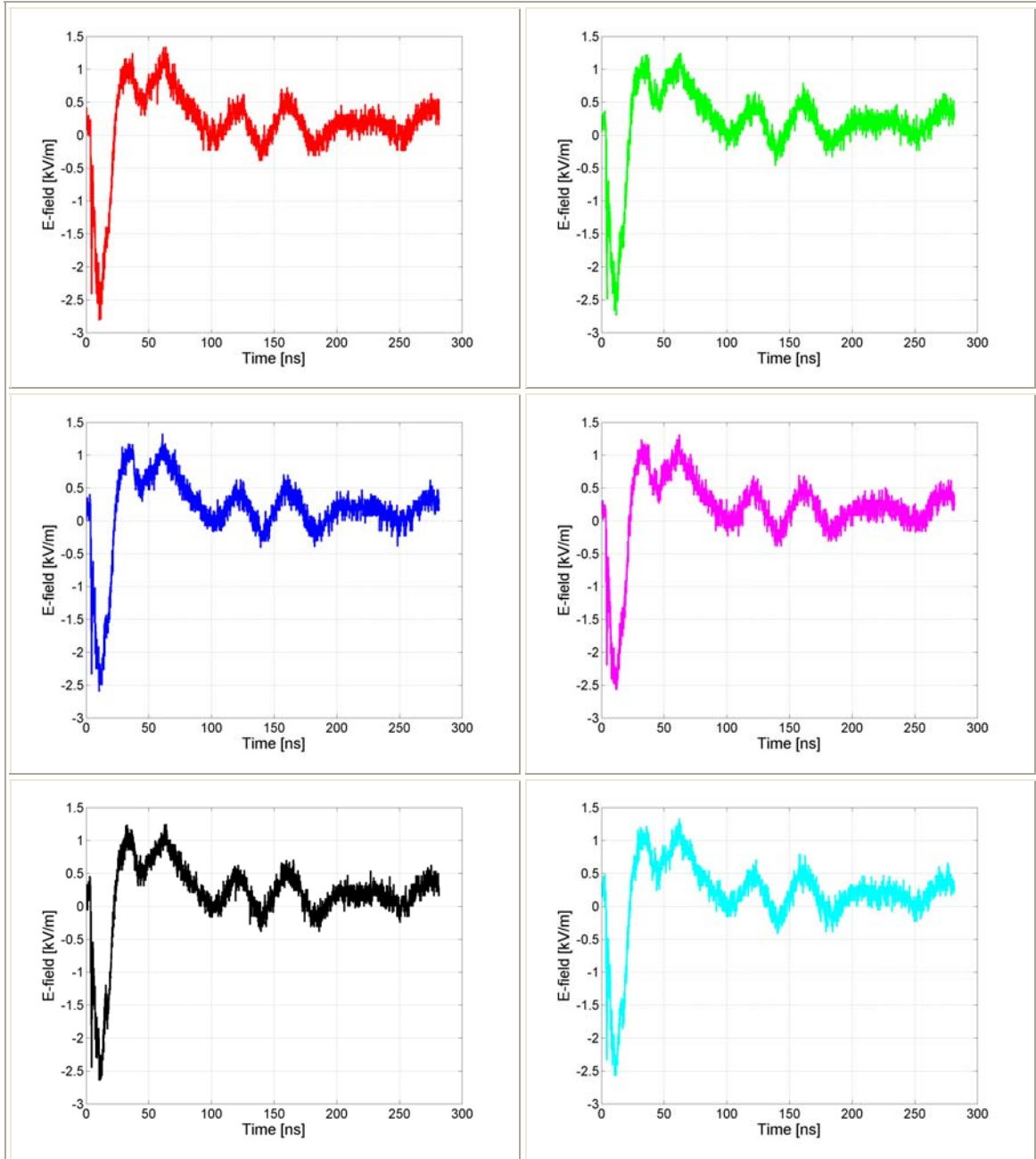
Σχήμα 5.13: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο A1 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση -2 kV.

- Σημείο A2 (35 cm)



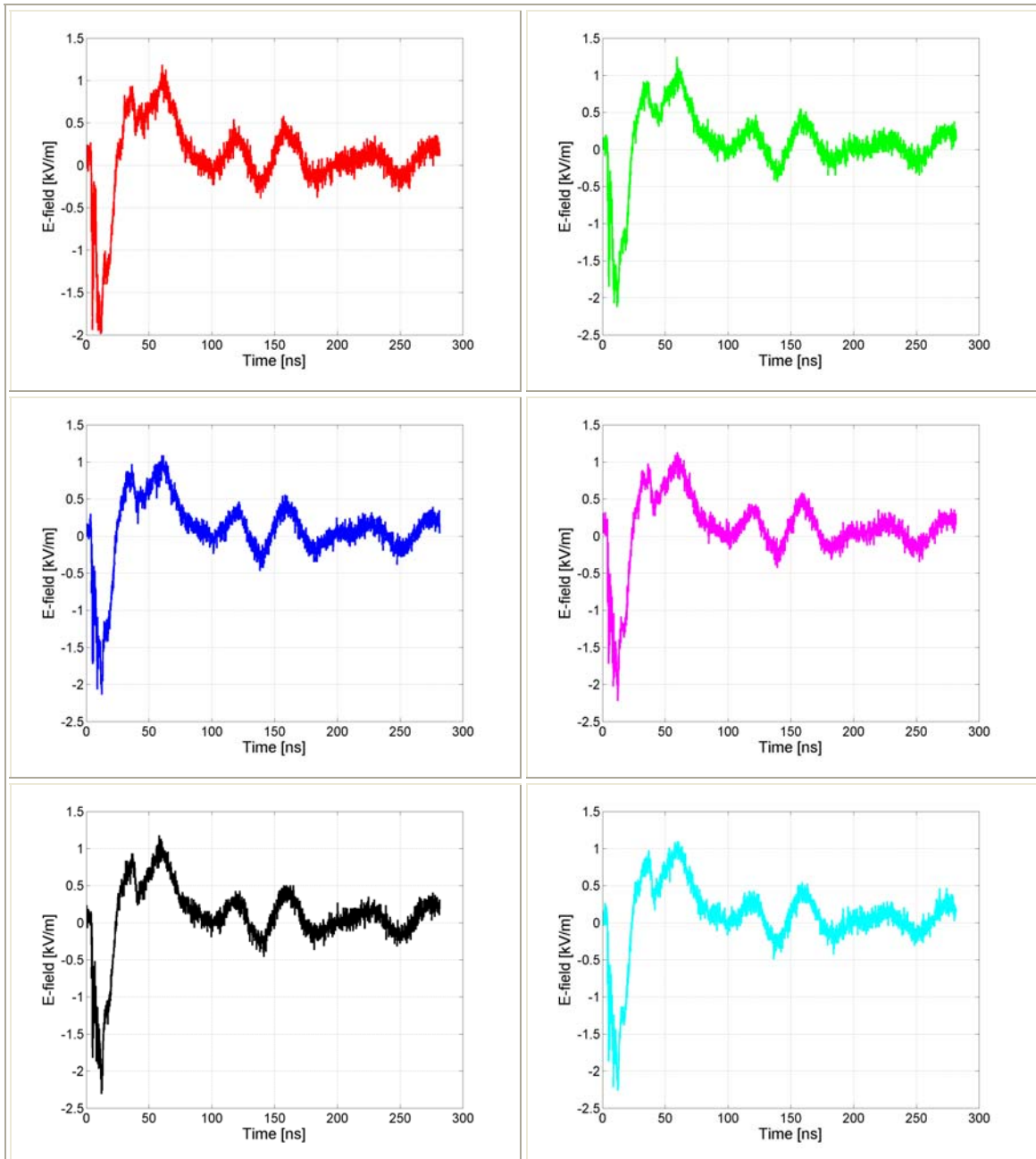
Σχήμα 5.14: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο A2 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση  $-2$  kV.

- Σημείο A3 (50 cm)



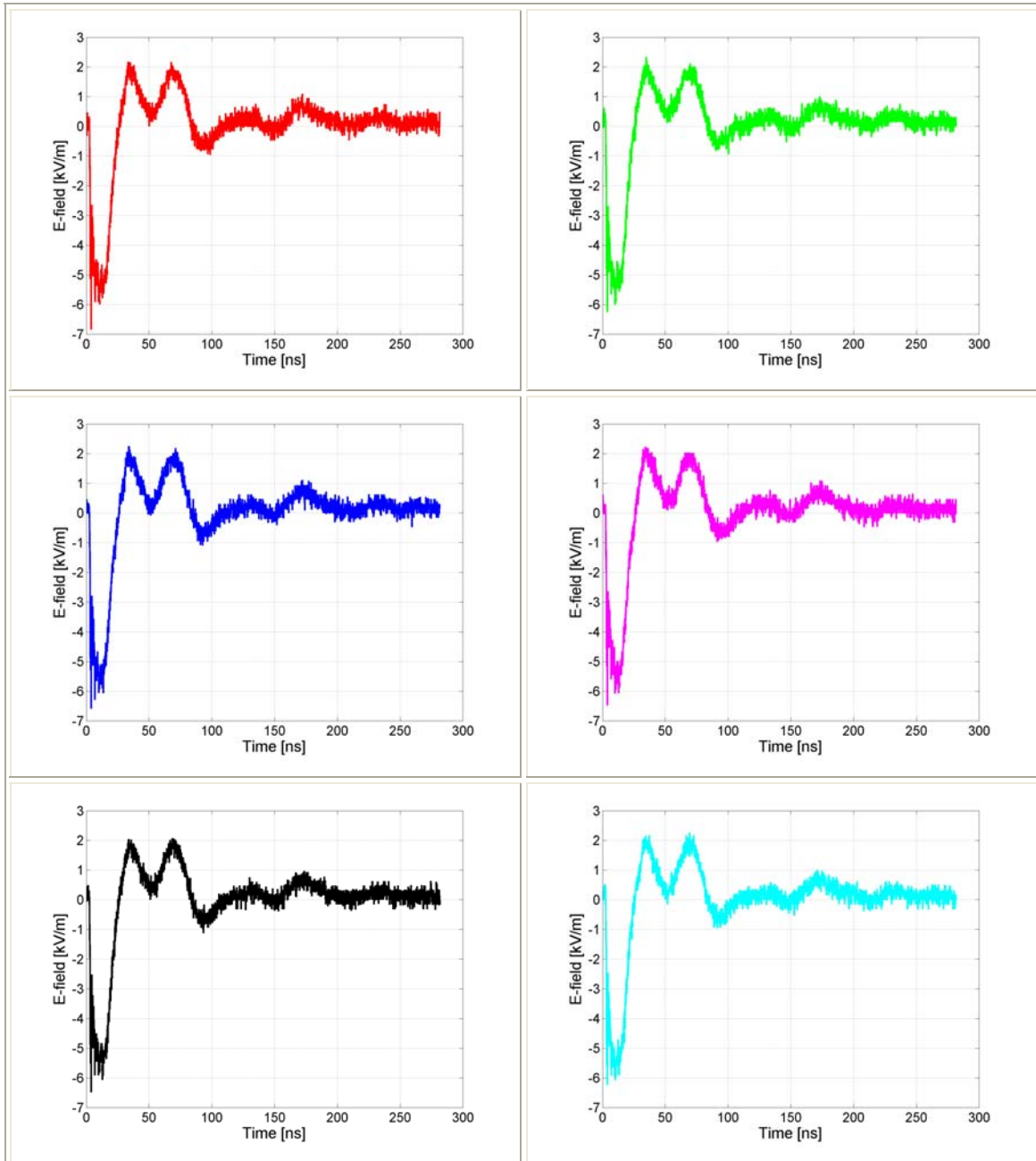
Σχήμα 5.15: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο A3 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση  $-2$  kV.

- Σημείο A4 (65 cm)



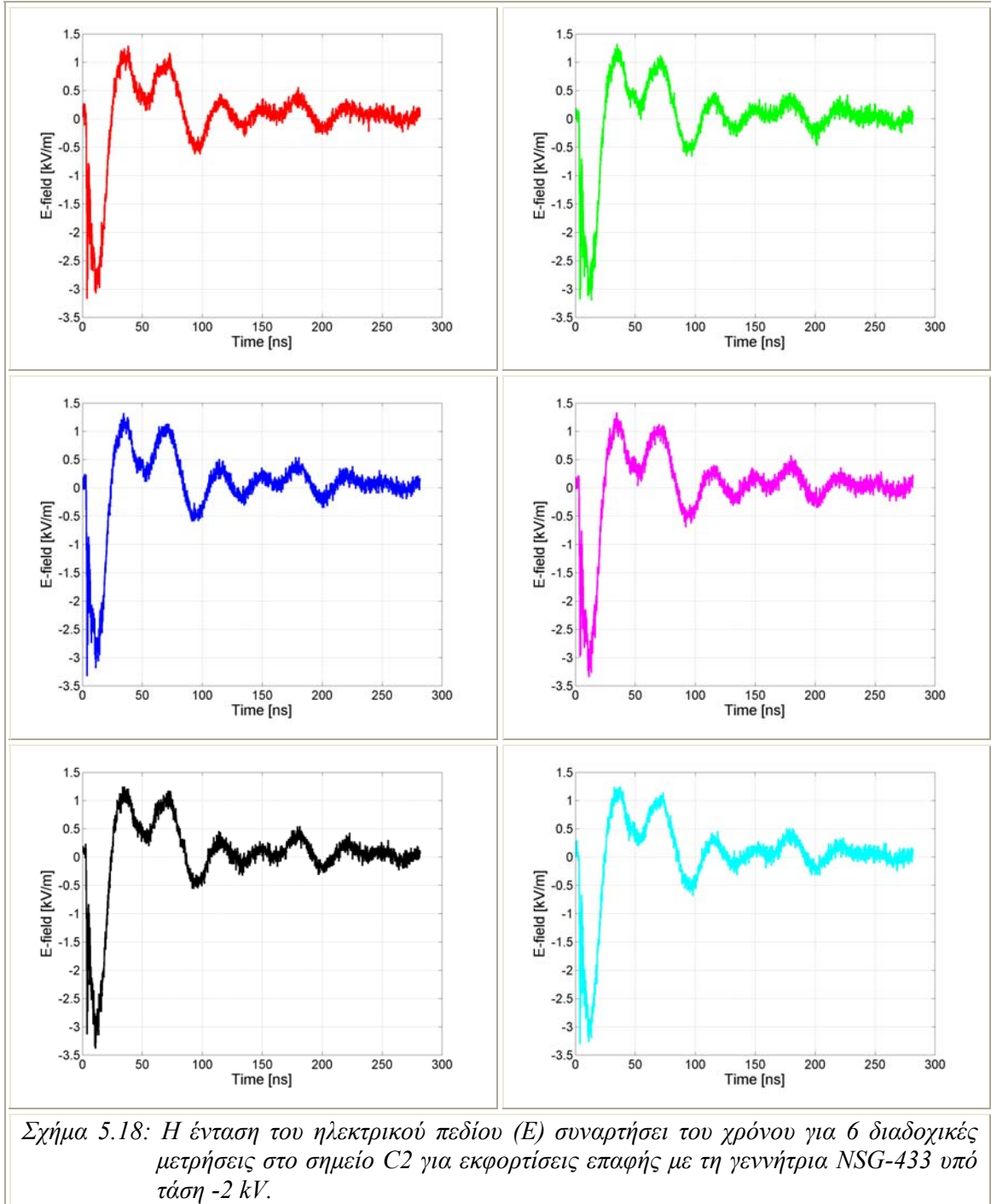
Σχήμα 5.16: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο A4 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση  $-2$  kV.

- Σημείο C1 (20 cm)

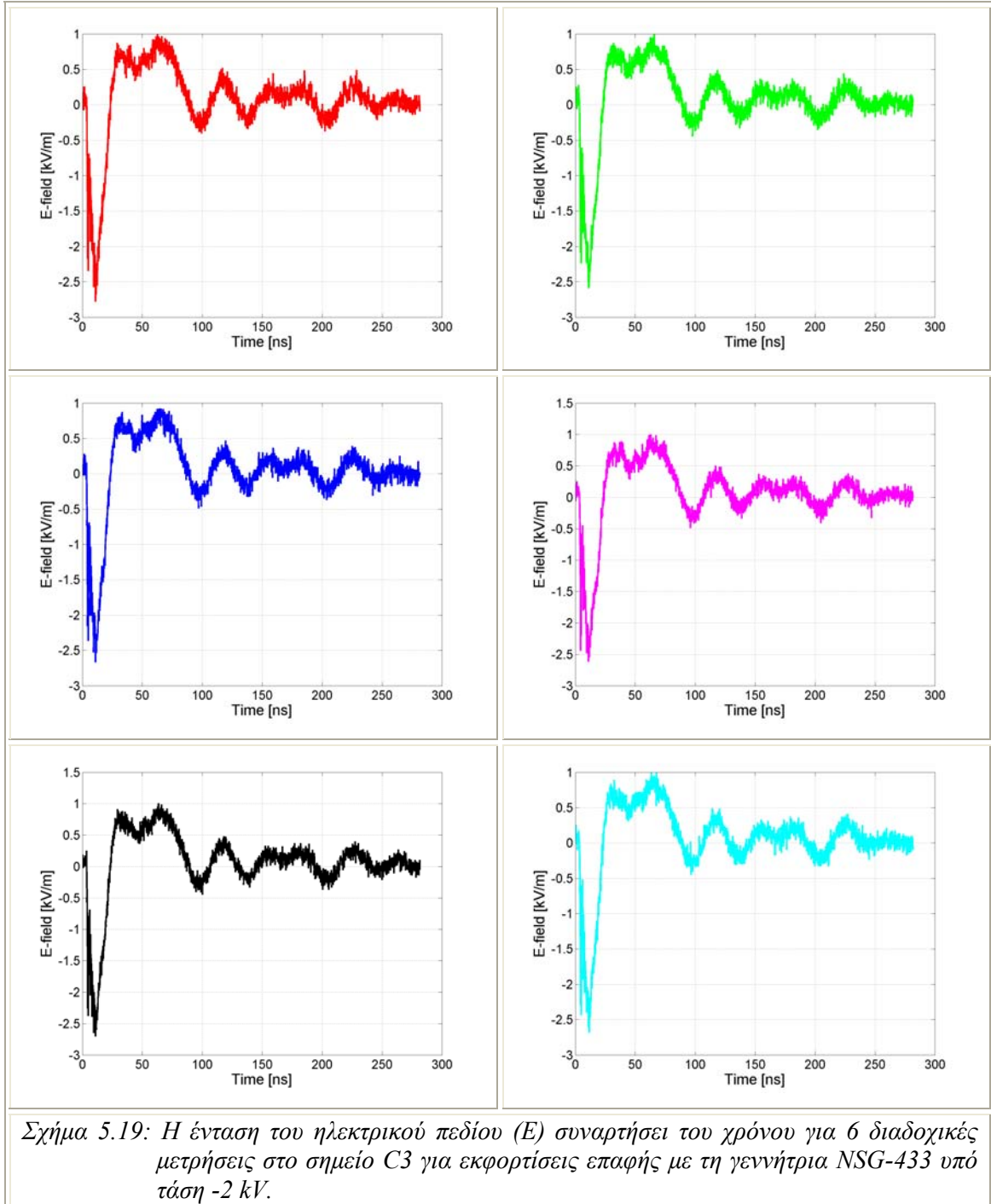


Σχήμα 5.17: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο C1 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση  $-2$  kV.

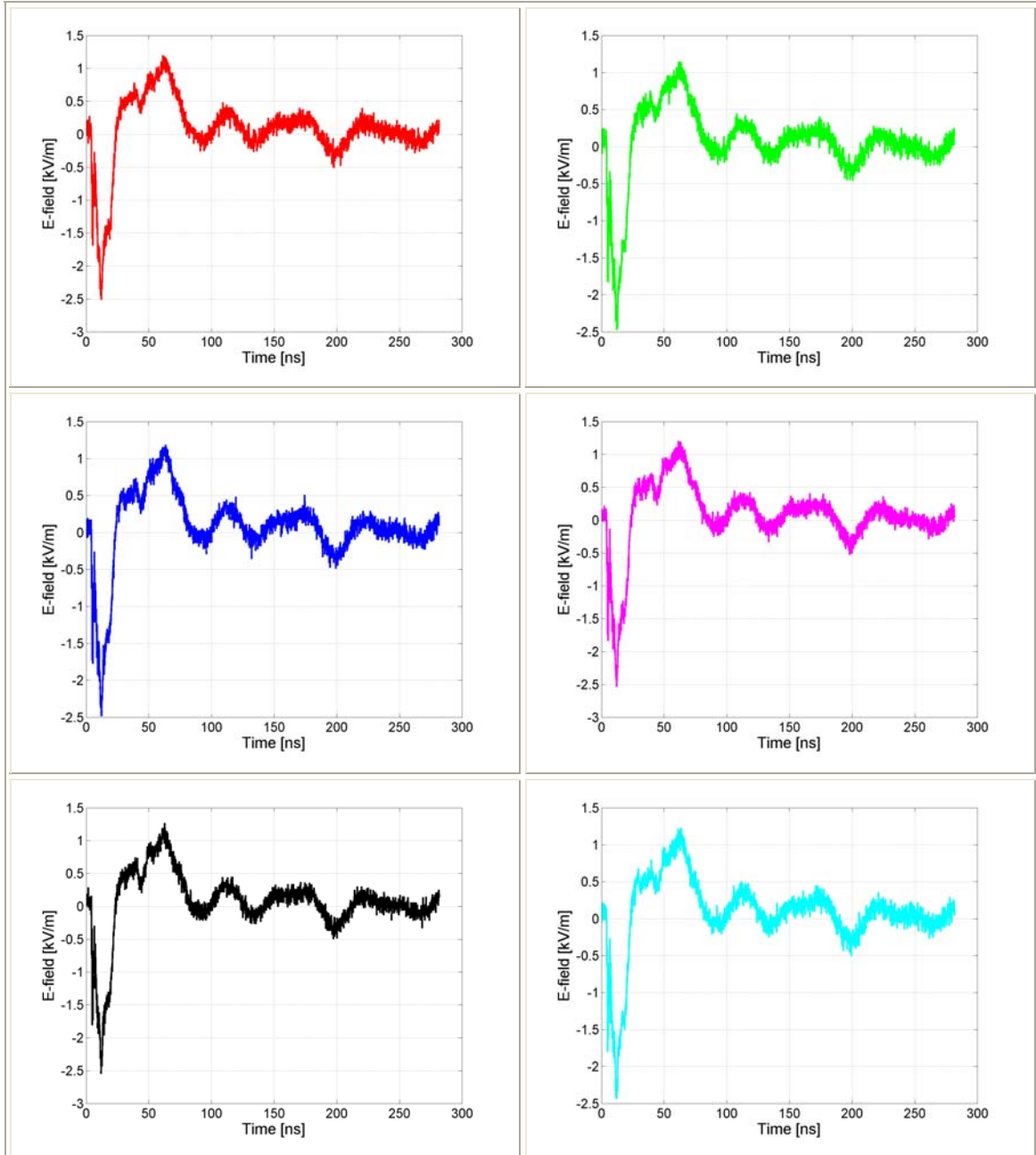
- Σημείο C2 (35 cm)



- Σημείο C3 (50 cm)



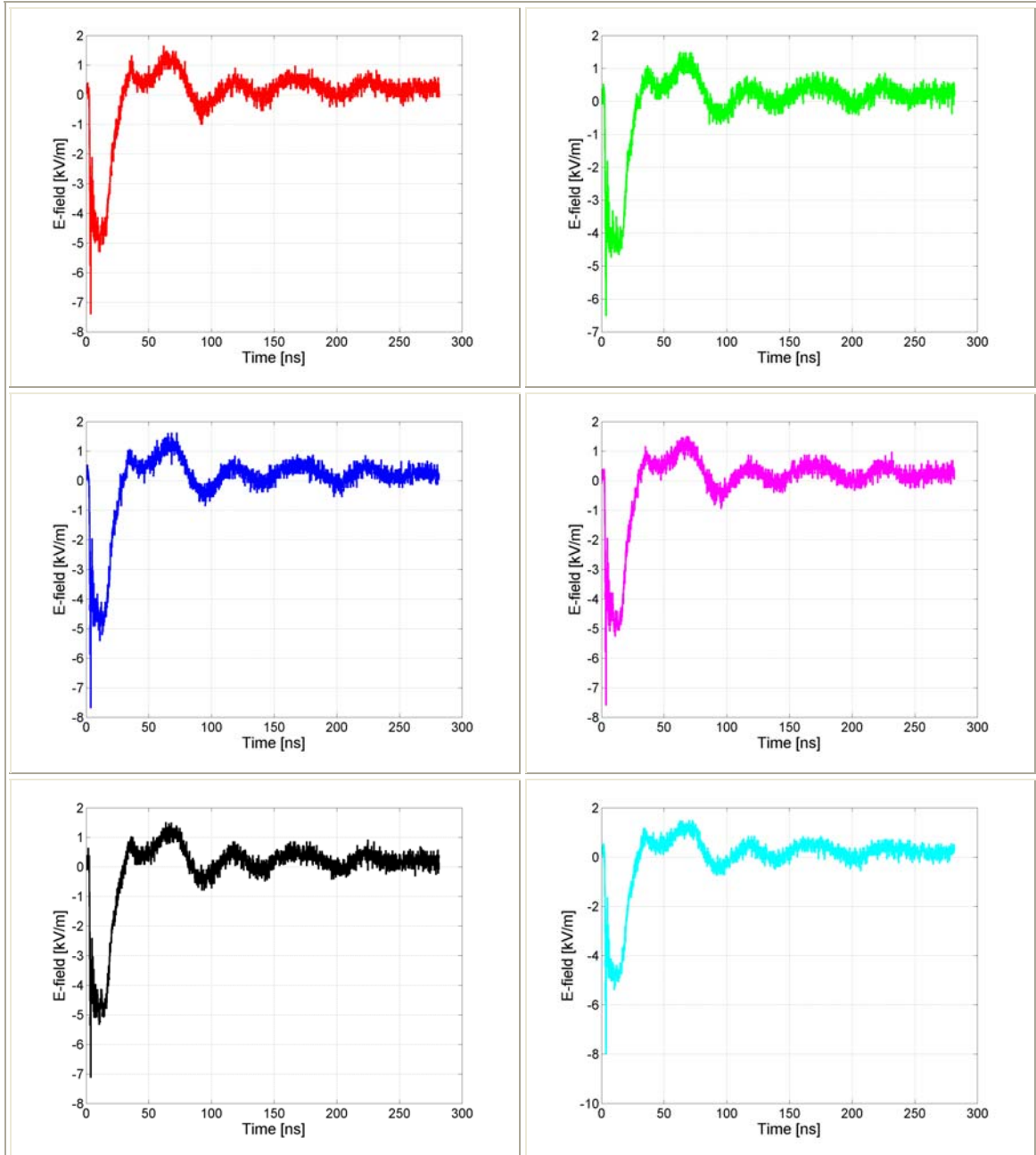
- Σημείο C4 (65 cm)



Σχήμα 5.20: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο C4 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση  $-2$  kV.

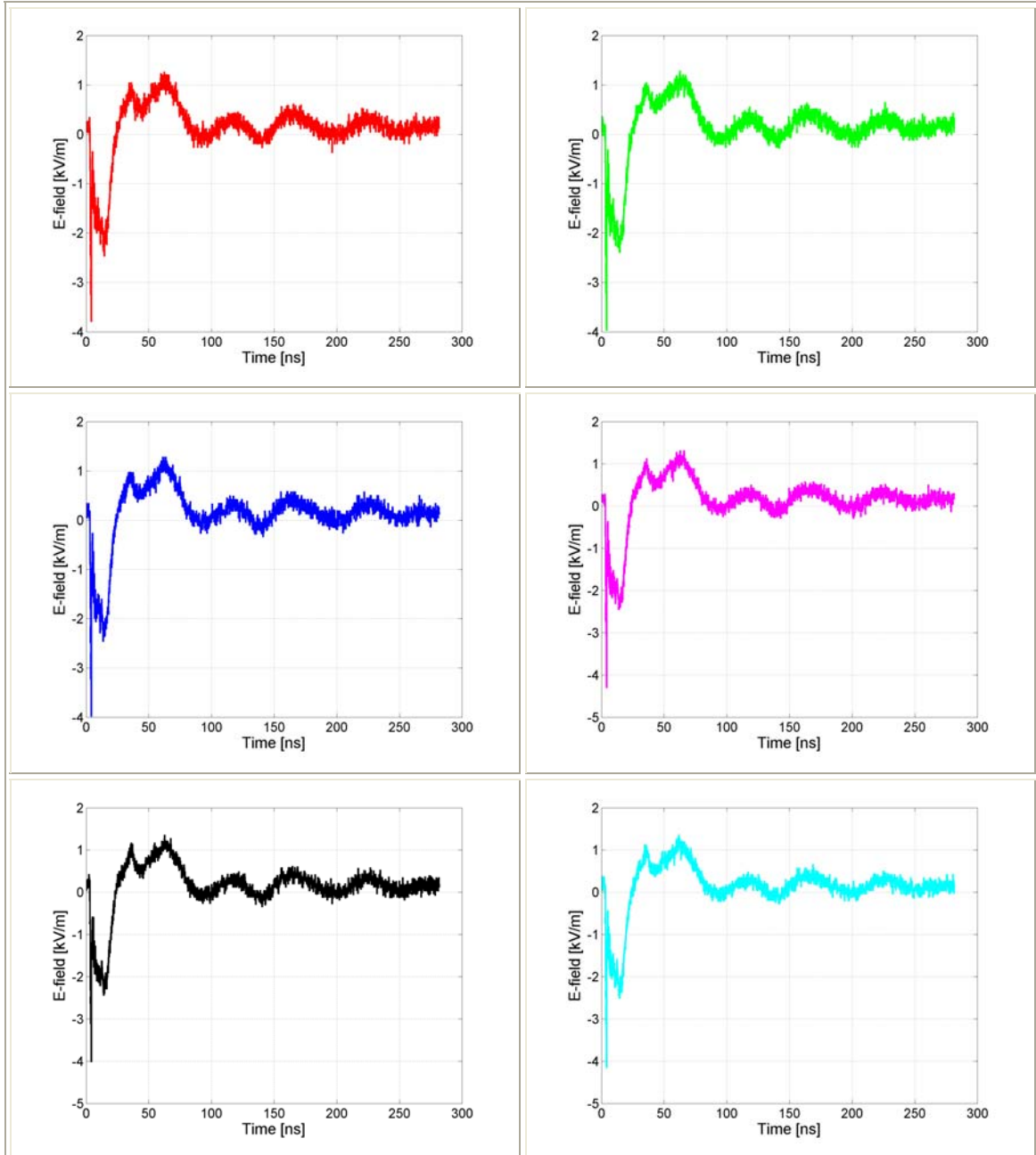


- Σημείο D1 (20 cm)



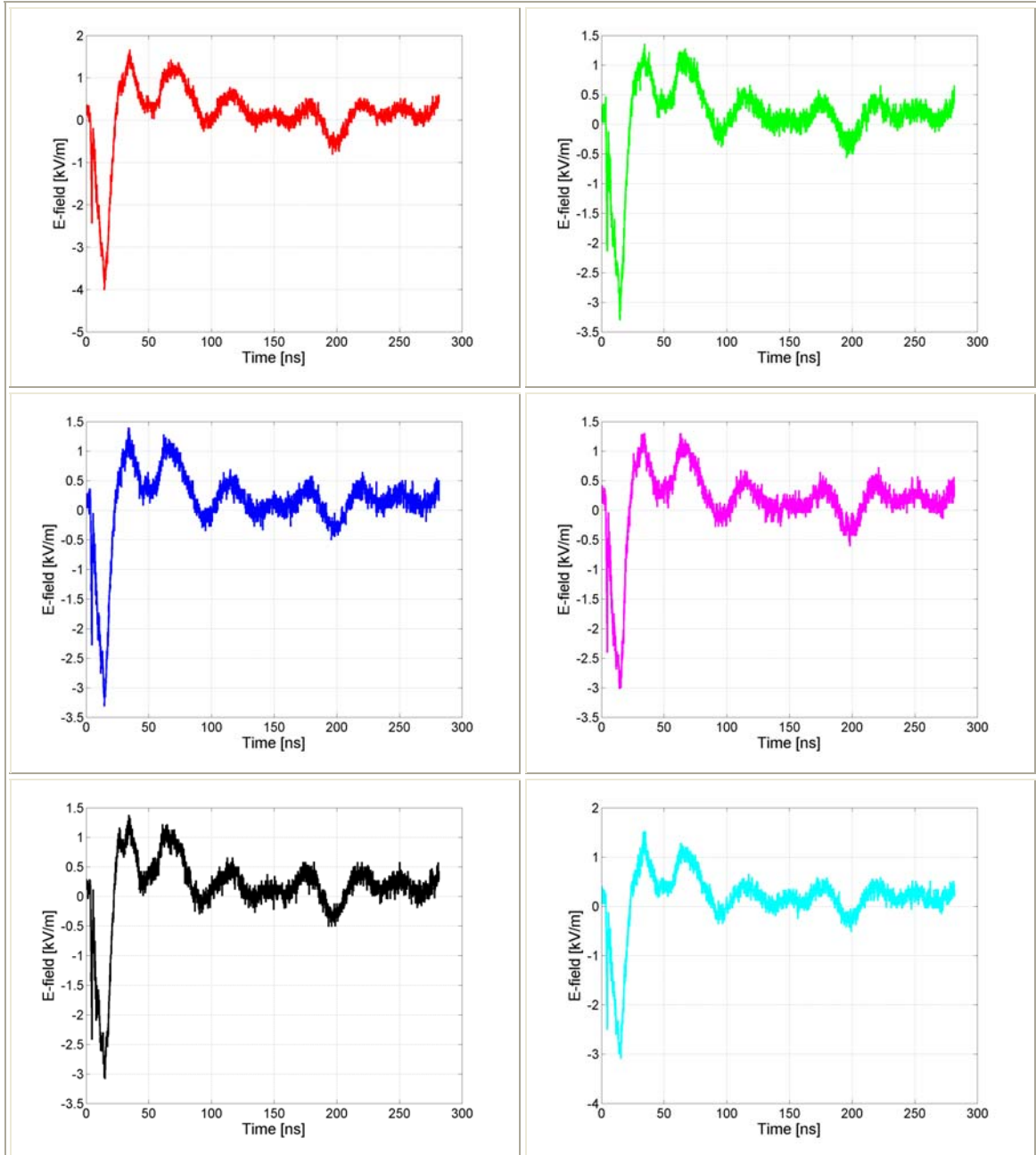
Σχήμα 5.21: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο D1 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση  $-2$  kV.

- Σημείο D2 (35 cm)



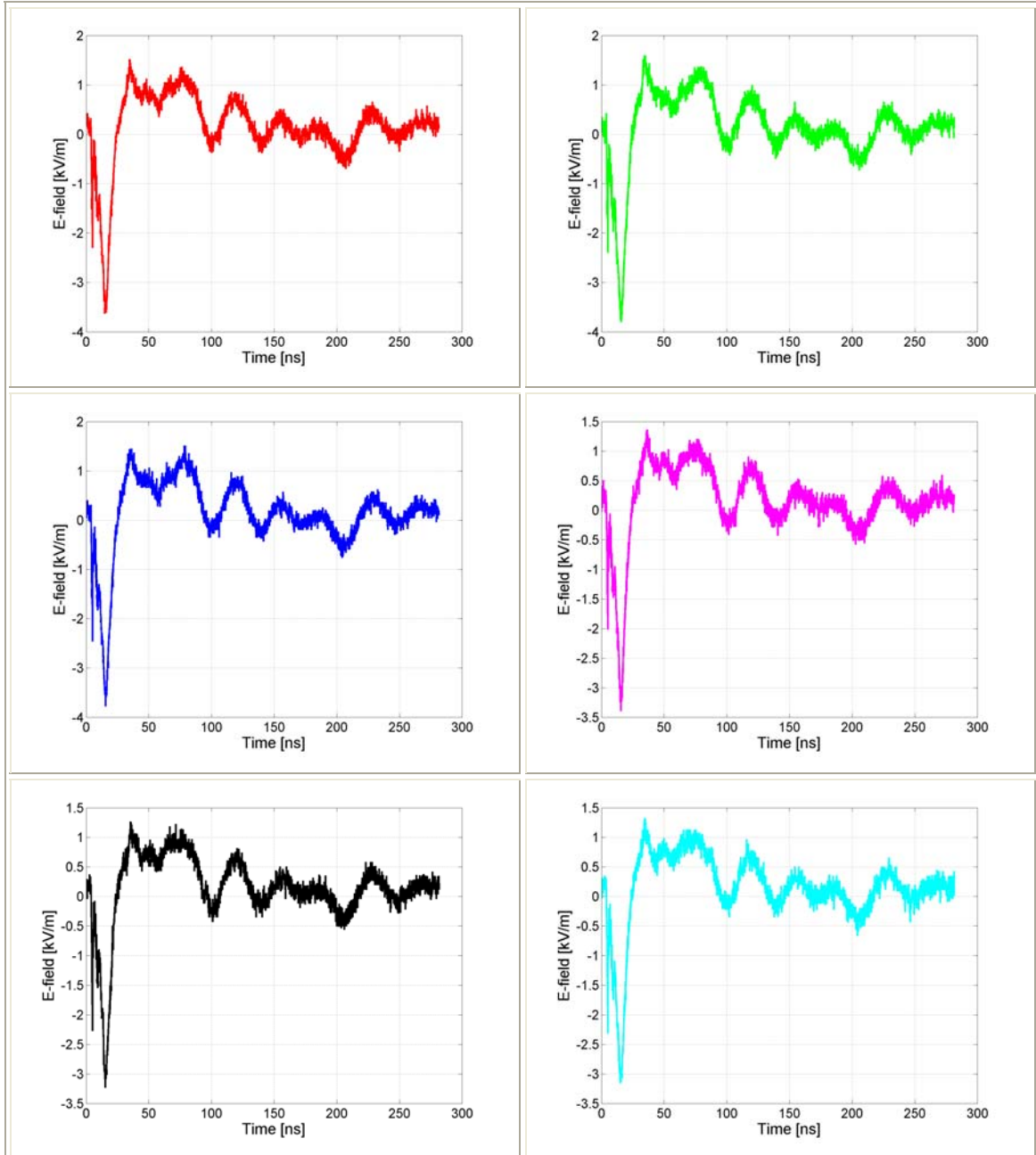
Σχήμα 5.22: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο D2 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση  $-2$  kV.

- Σημείο D3 (50 cm)



Σχήμα 5.23: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο D3 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση  $-2$  kV.

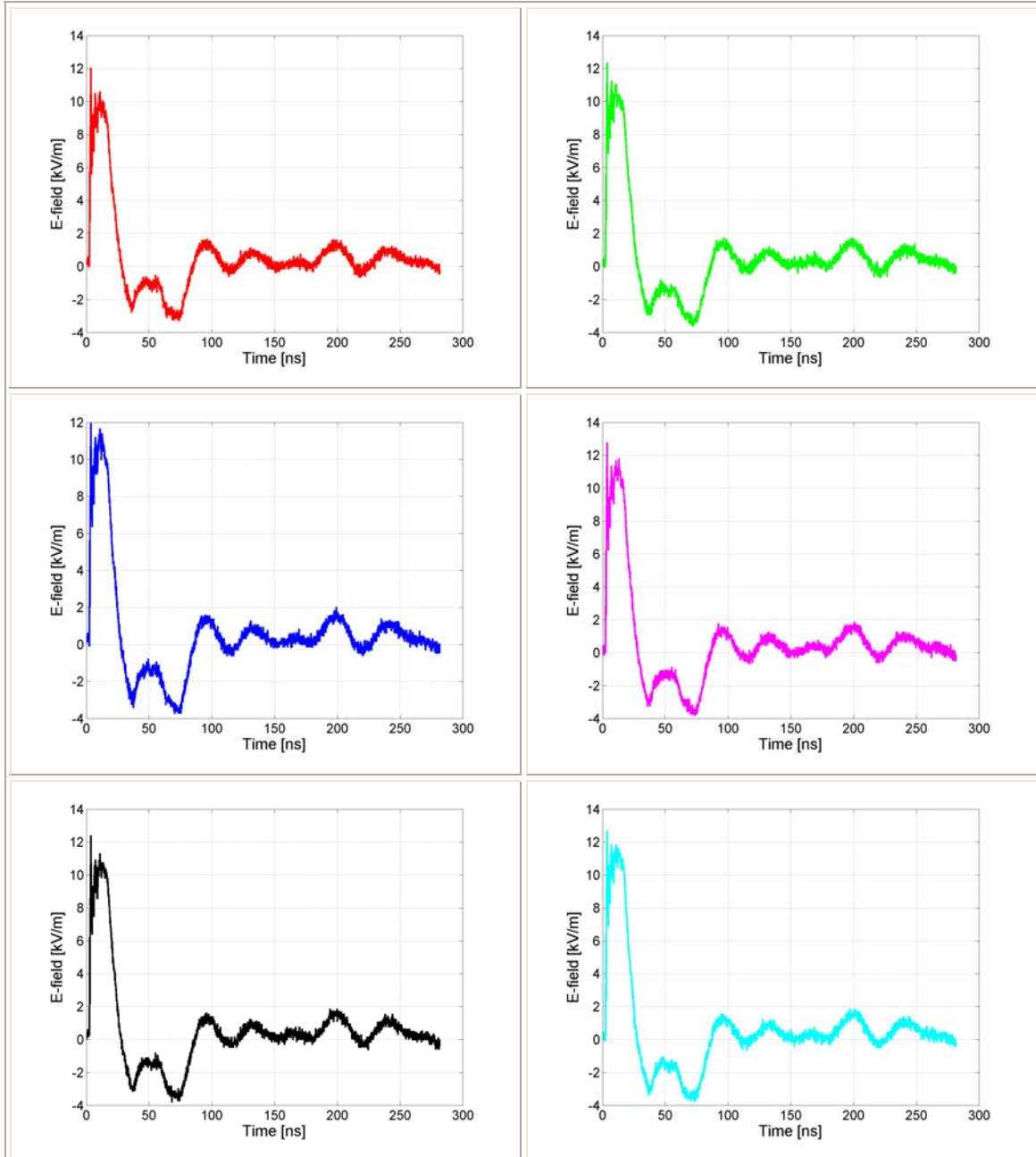
- Σημείο D4 (65 cm)



Σχήμα 5.24: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο D4 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση -2 kV.

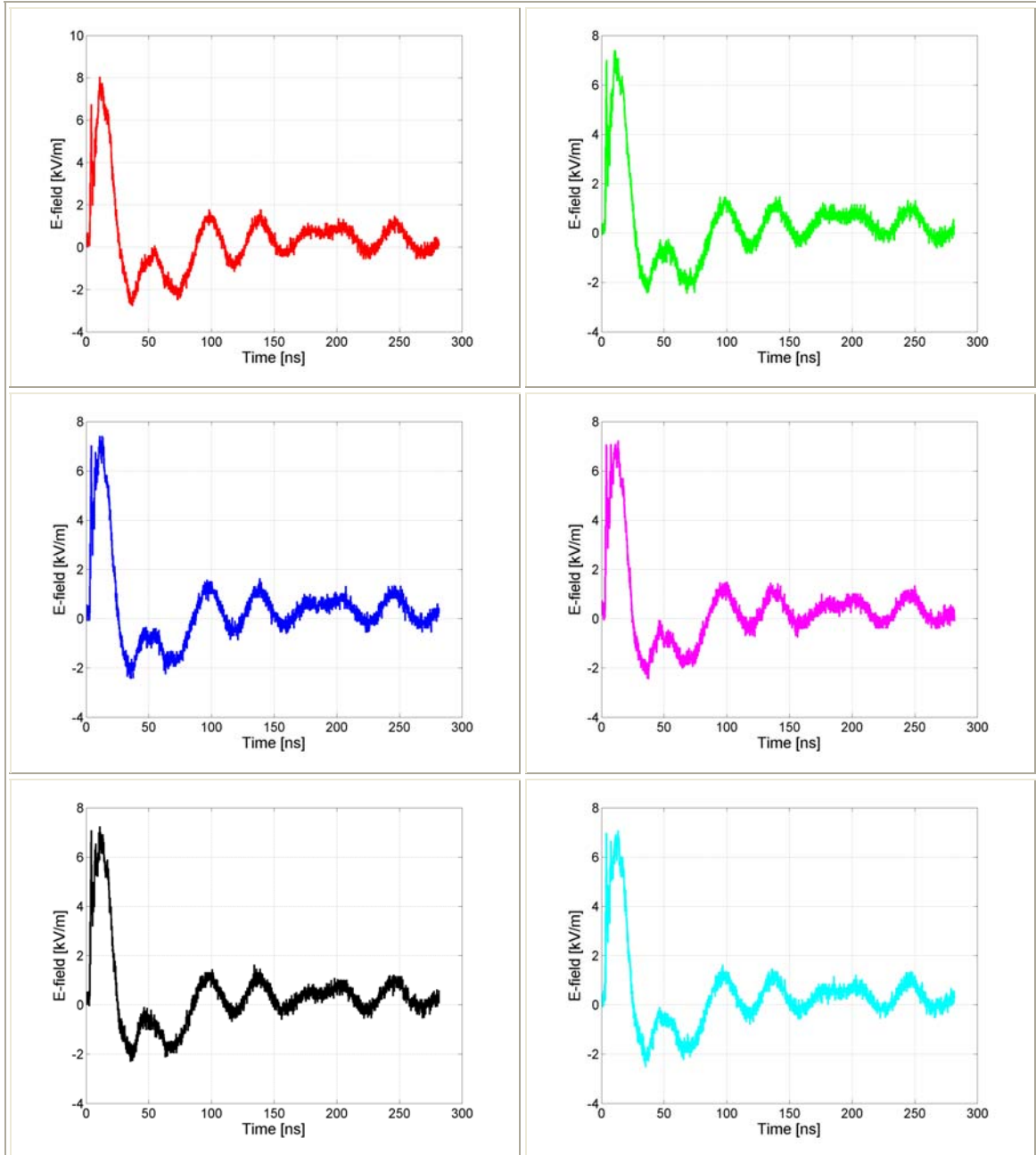
### 5.2.3 Εκφορτίσεις επαφής υπό τάση 4 kV με τη γεννήτρια NSG-433

- Σημείο A1 (20 cm)



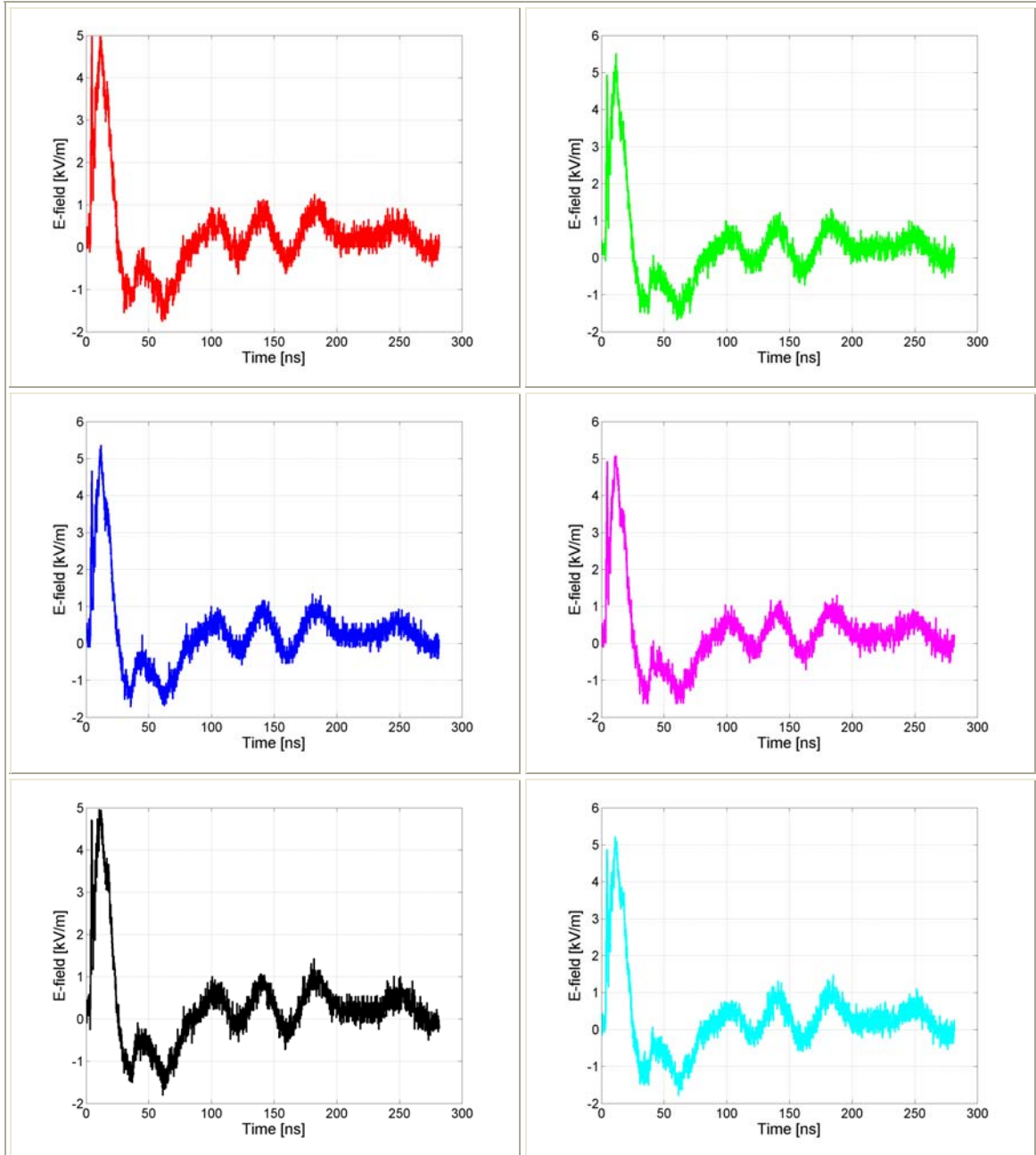
Σχήμα 5.25: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο A1 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση 4 kV.

- Σημείο A2 (35 cm)



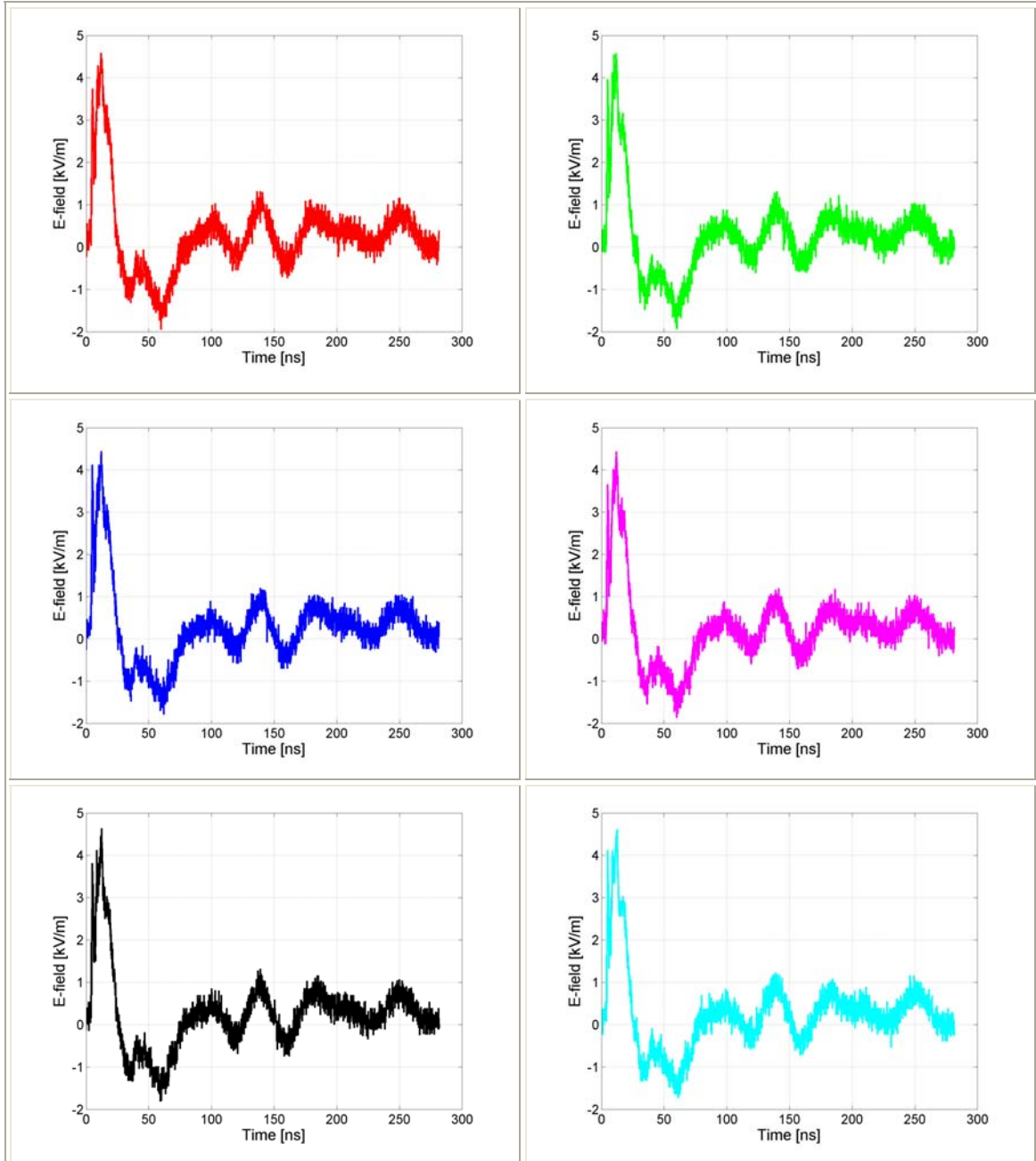
Σχήμα 5.26: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο A2 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση 4 kV.

- Σημείο A3 (50 cm)



Σχήμα 5.27: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο A3 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση 4 kV.

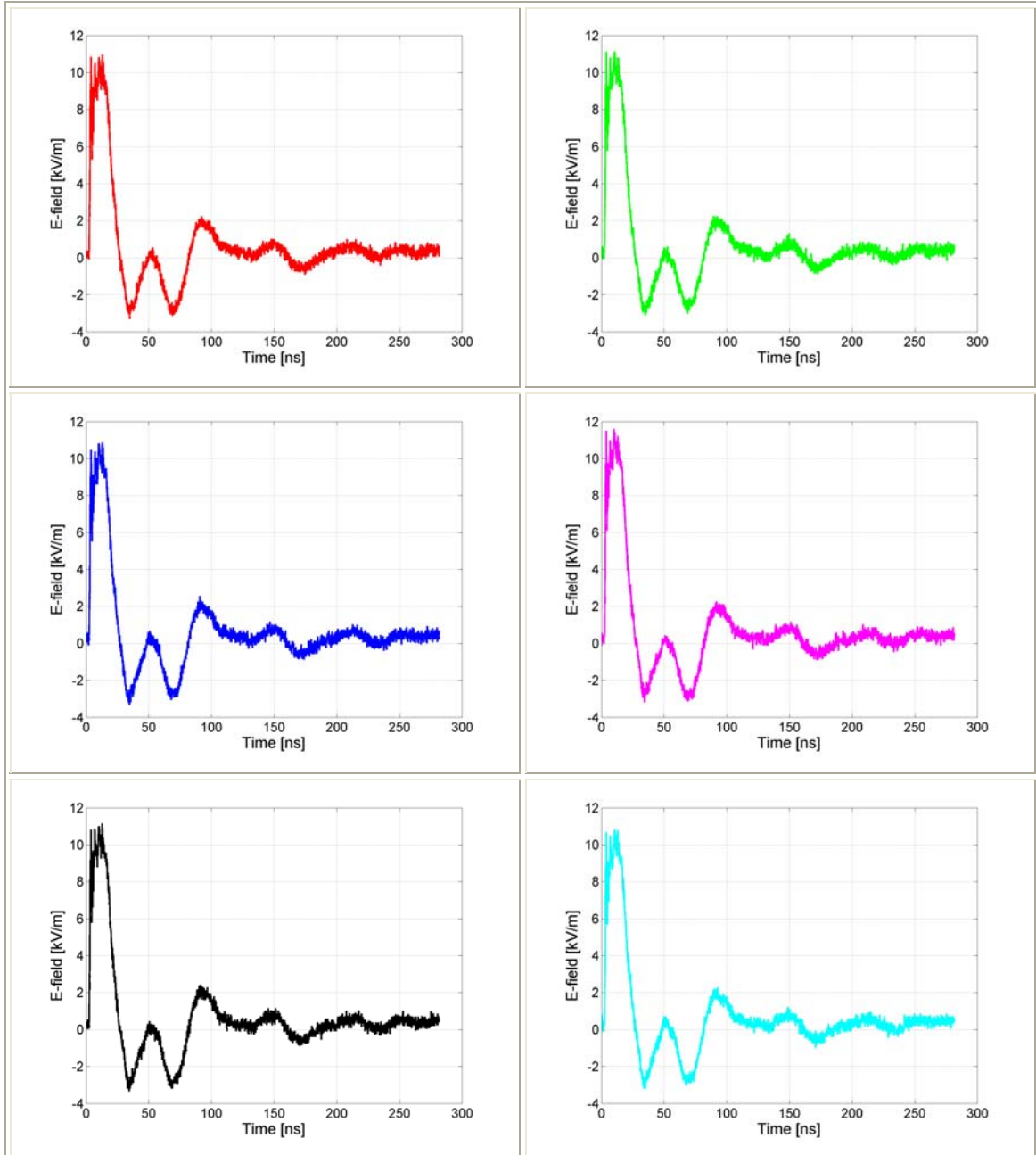
- Σημείο A4 (65 cm)



Σχήμα 5.28: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο A4 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση 4 kV.

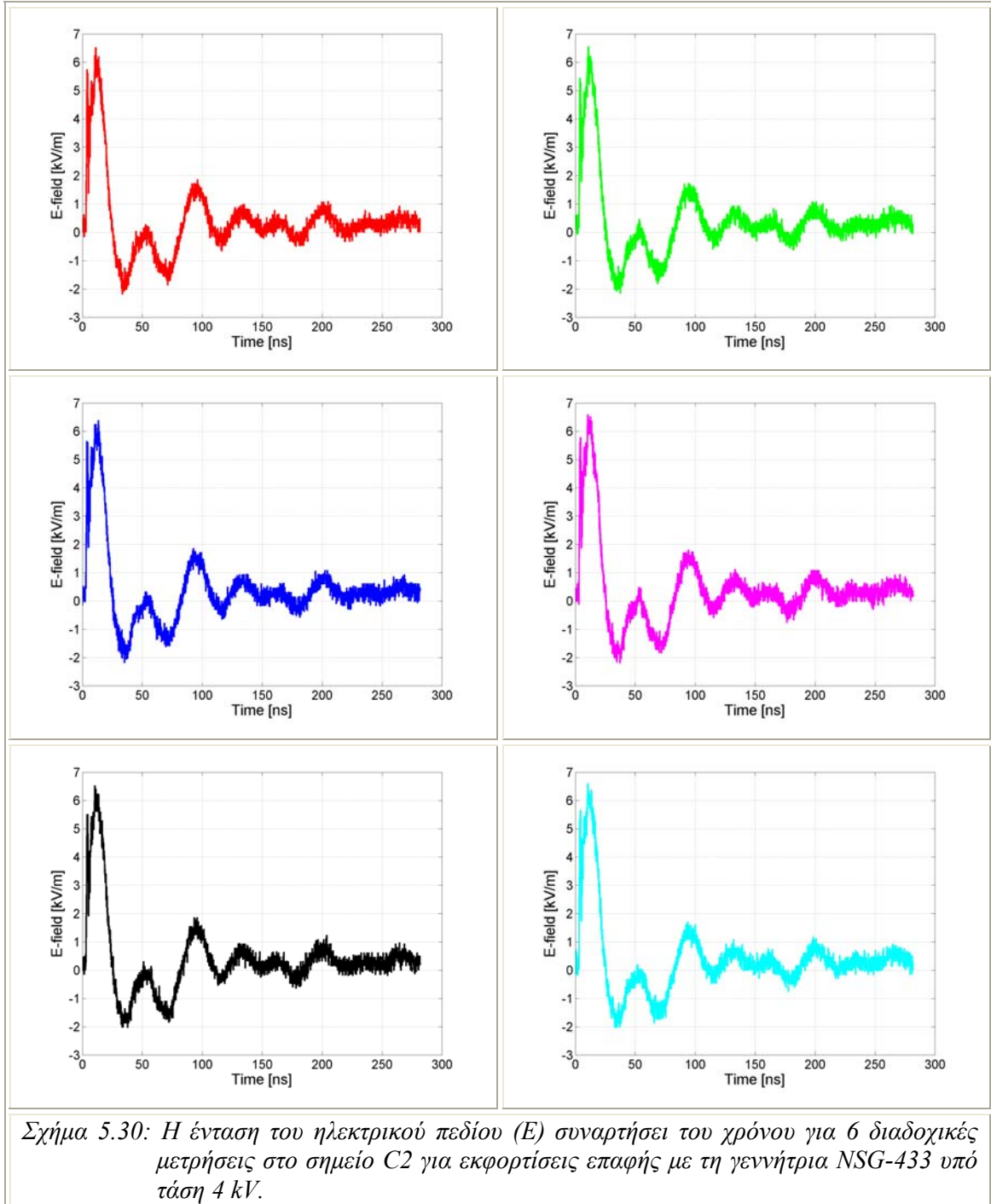


- Σημείο C1 (20 cm)

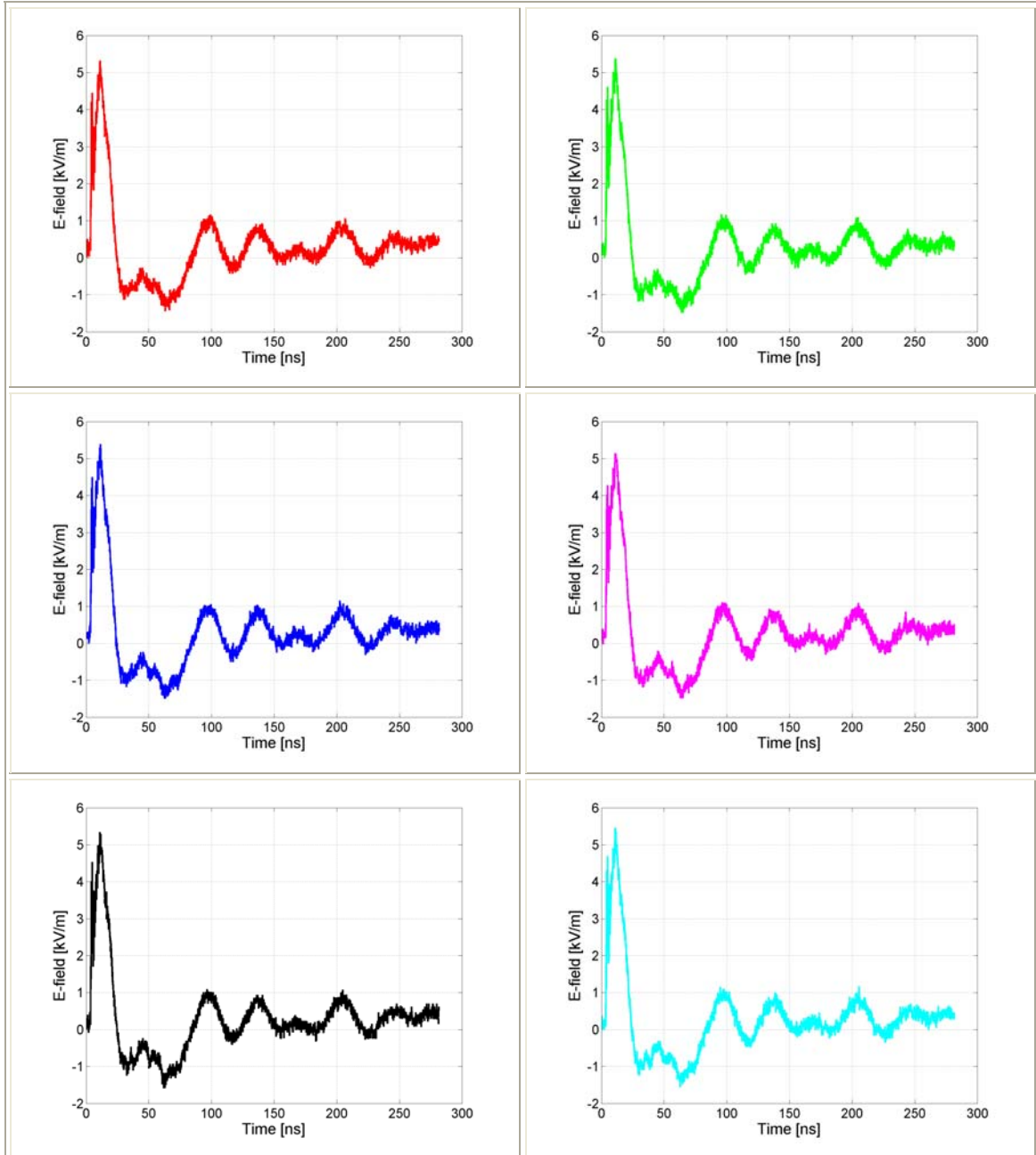


Σχήμα 5.29: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο C1 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση 4 kV.

- Σημείο C2 (35 cm)

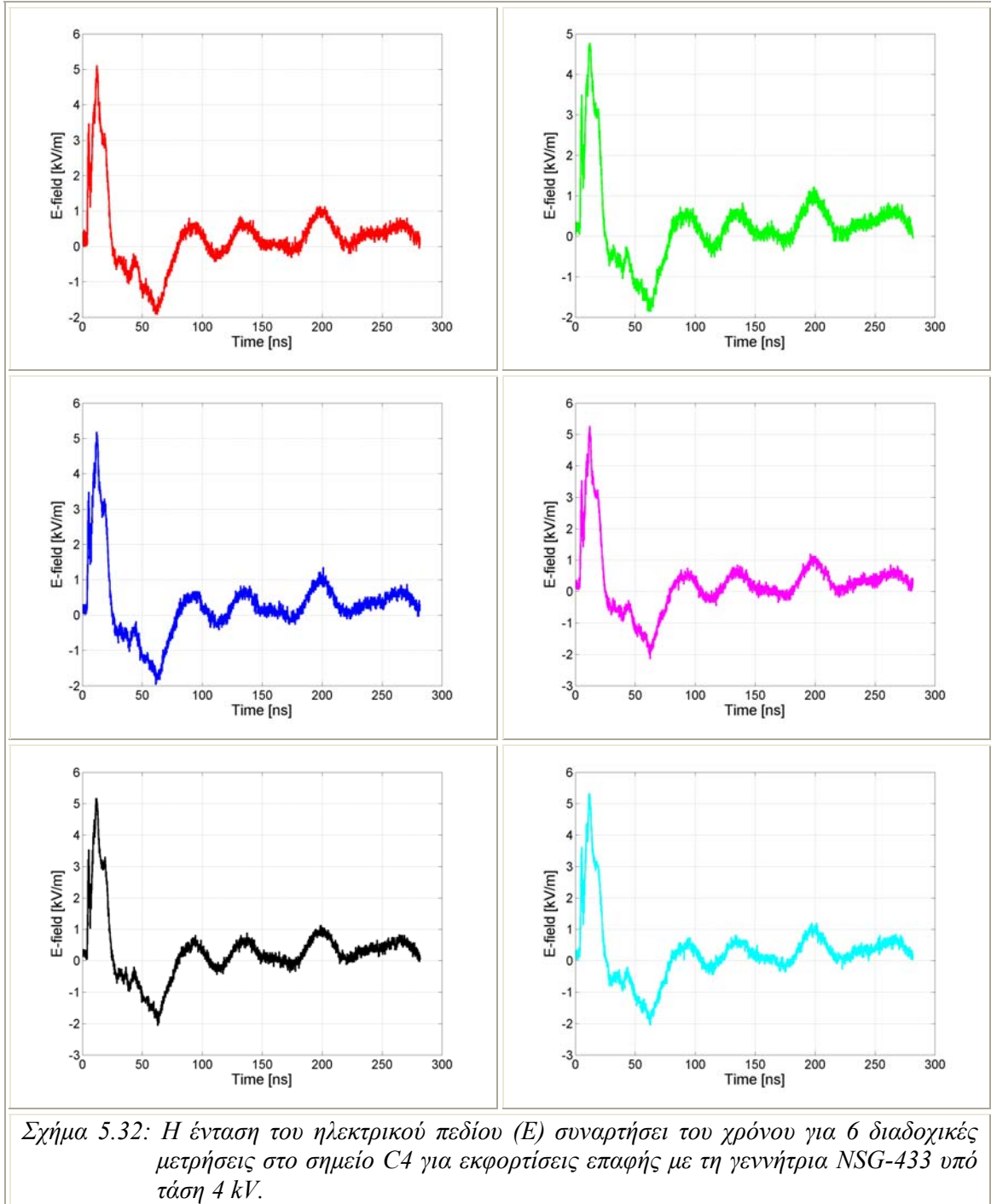


- Σημείο C3 (50 cm)

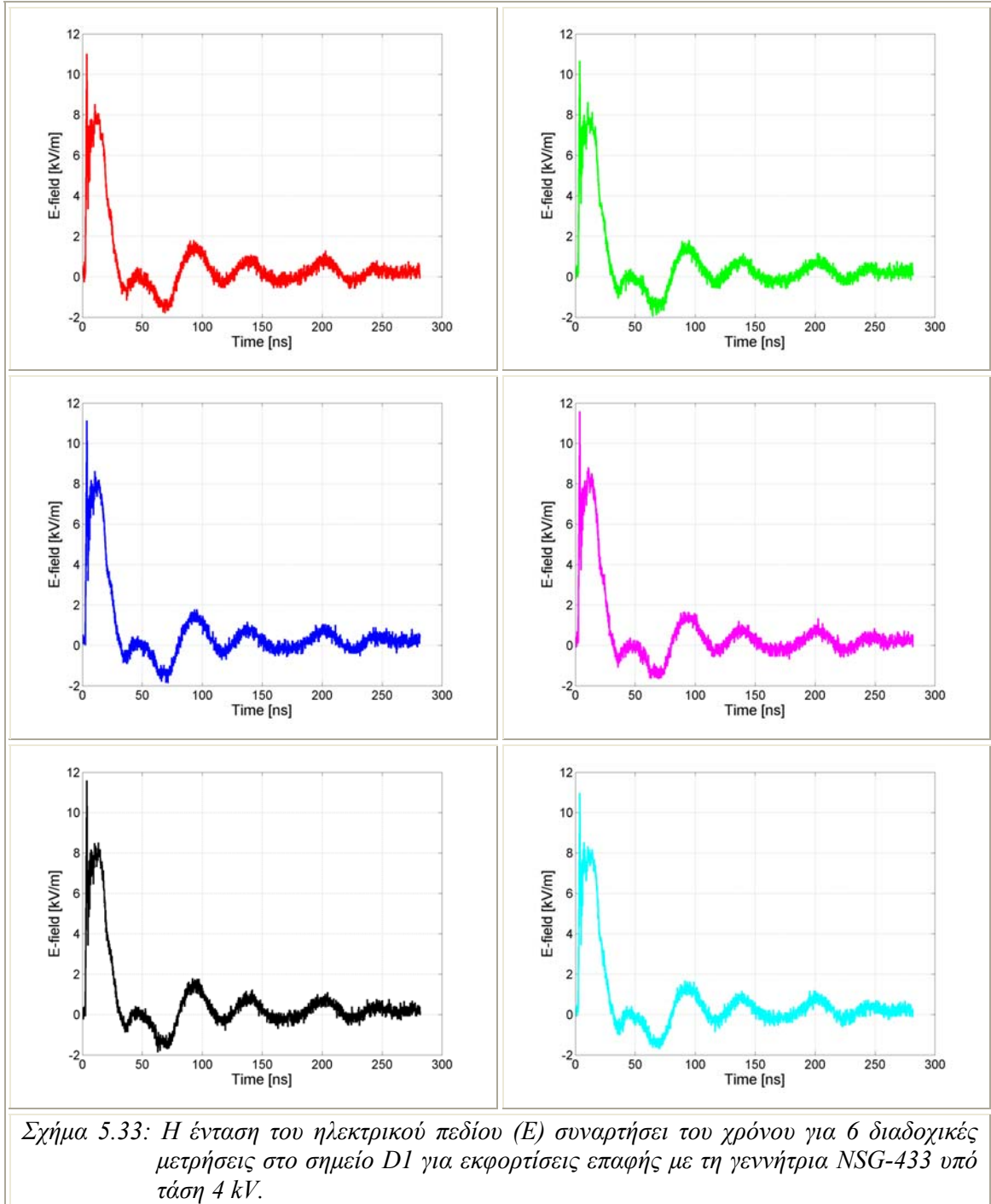


Σχήμα 5.31: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο C3 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση 4 kV.

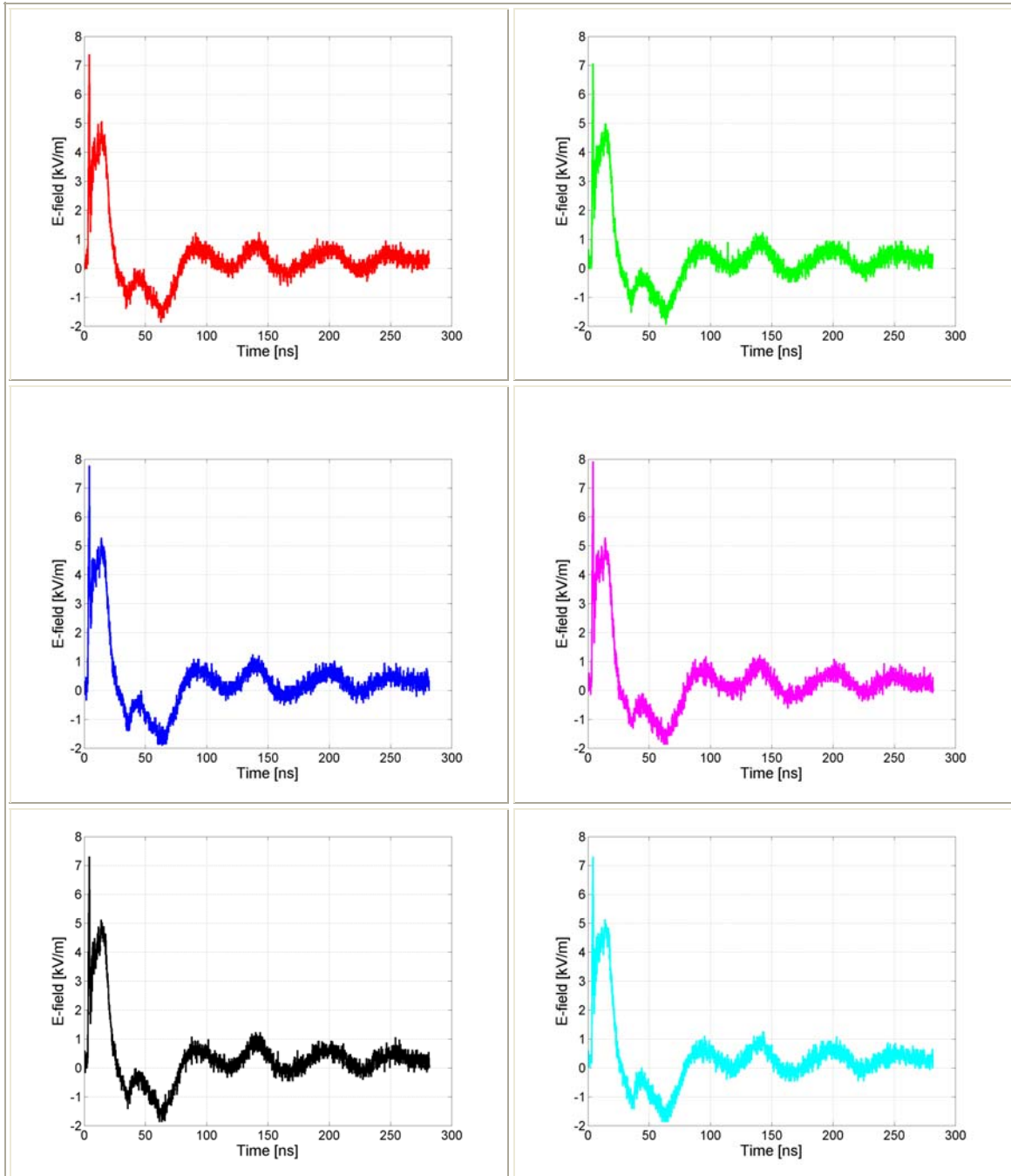
- Σημείο C4 (65 cm)



- Σημείο D1 (20 cm)

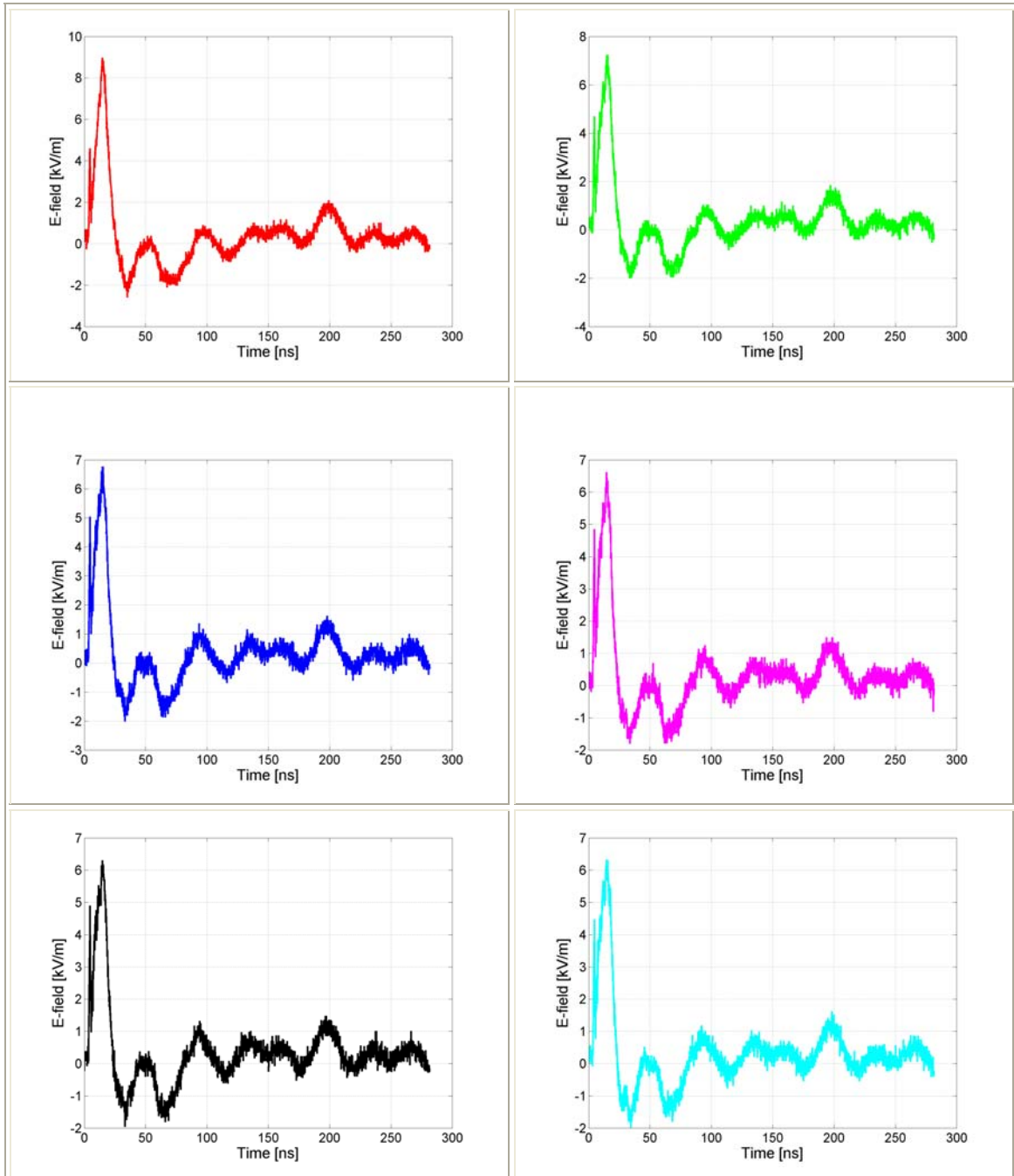


- Σημείο D2 (35 cm)



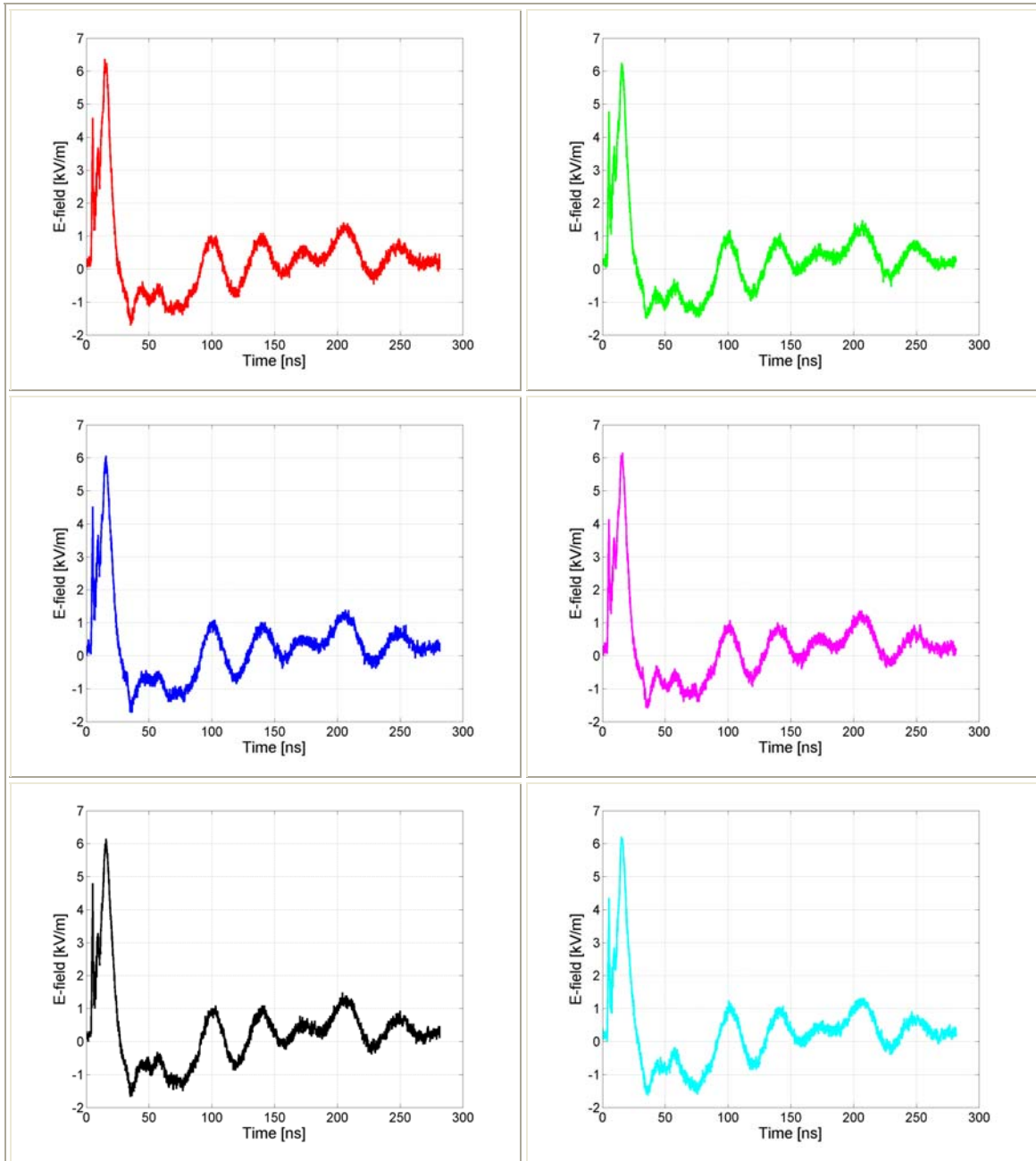
Σχήμα 5.34: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο D2 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση 4 kV.

- Σημείο D3 (50 cm)



Σχήμα 5.35: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο D3 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση 4 kV.

- Σημείο D4 (65 cm)

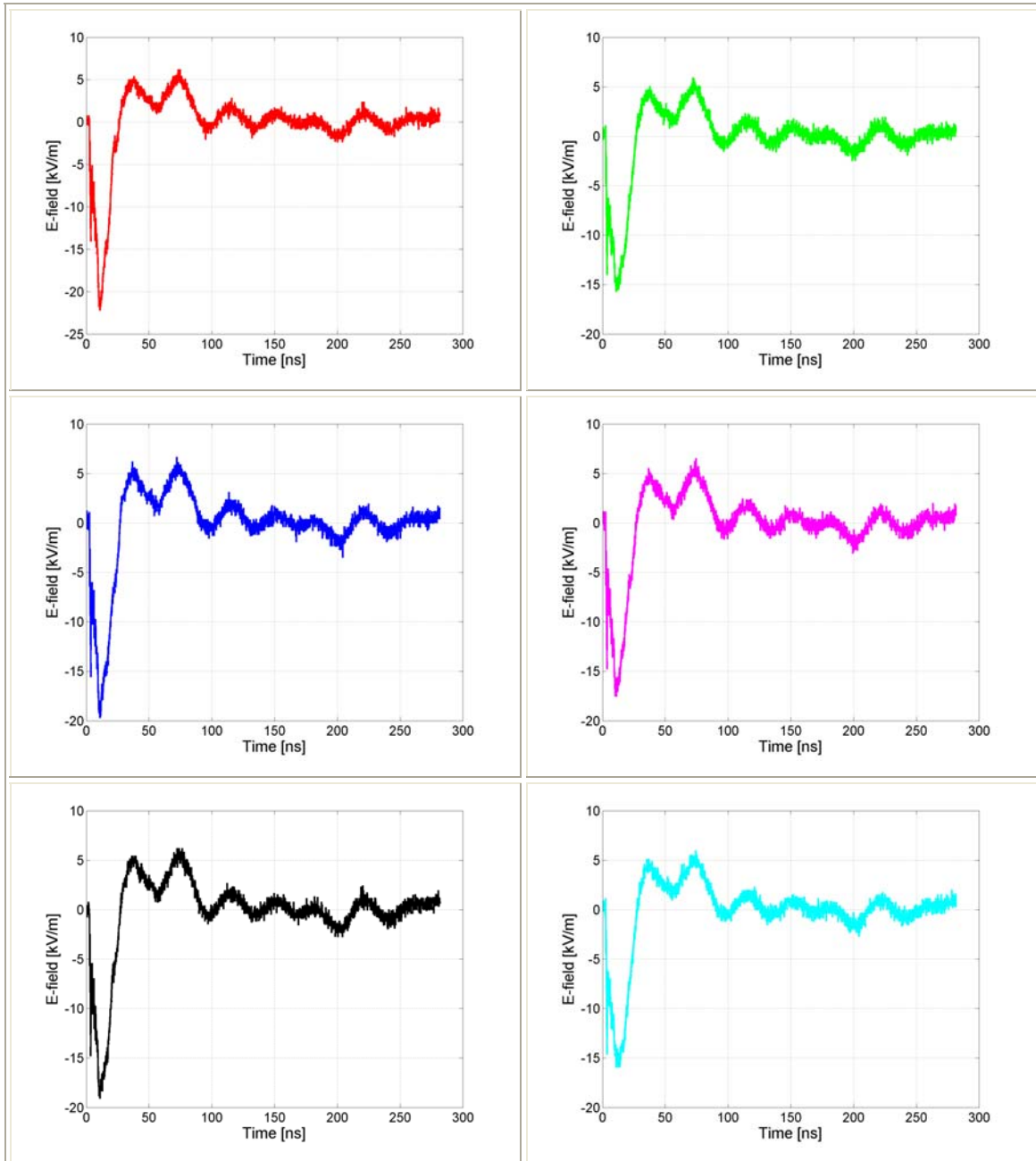


Σχήμα 5.36: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο D4 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση 4 kV.



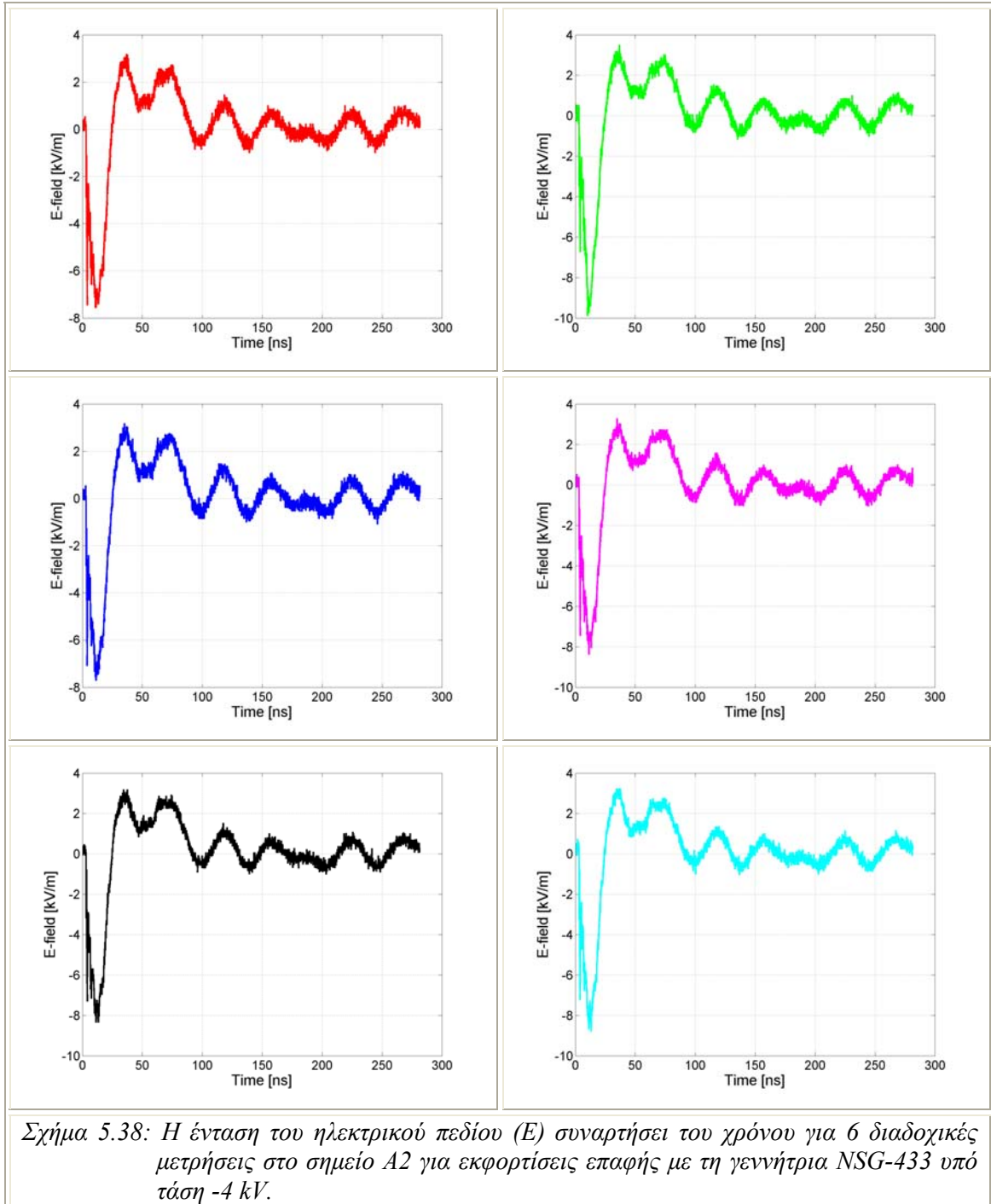
### 5.2.4 Εκφορτίσεις επαφής υπό τάση -4 kV με τη γεννήτρια NSG-433

- Σημείο A1 (20 cm)

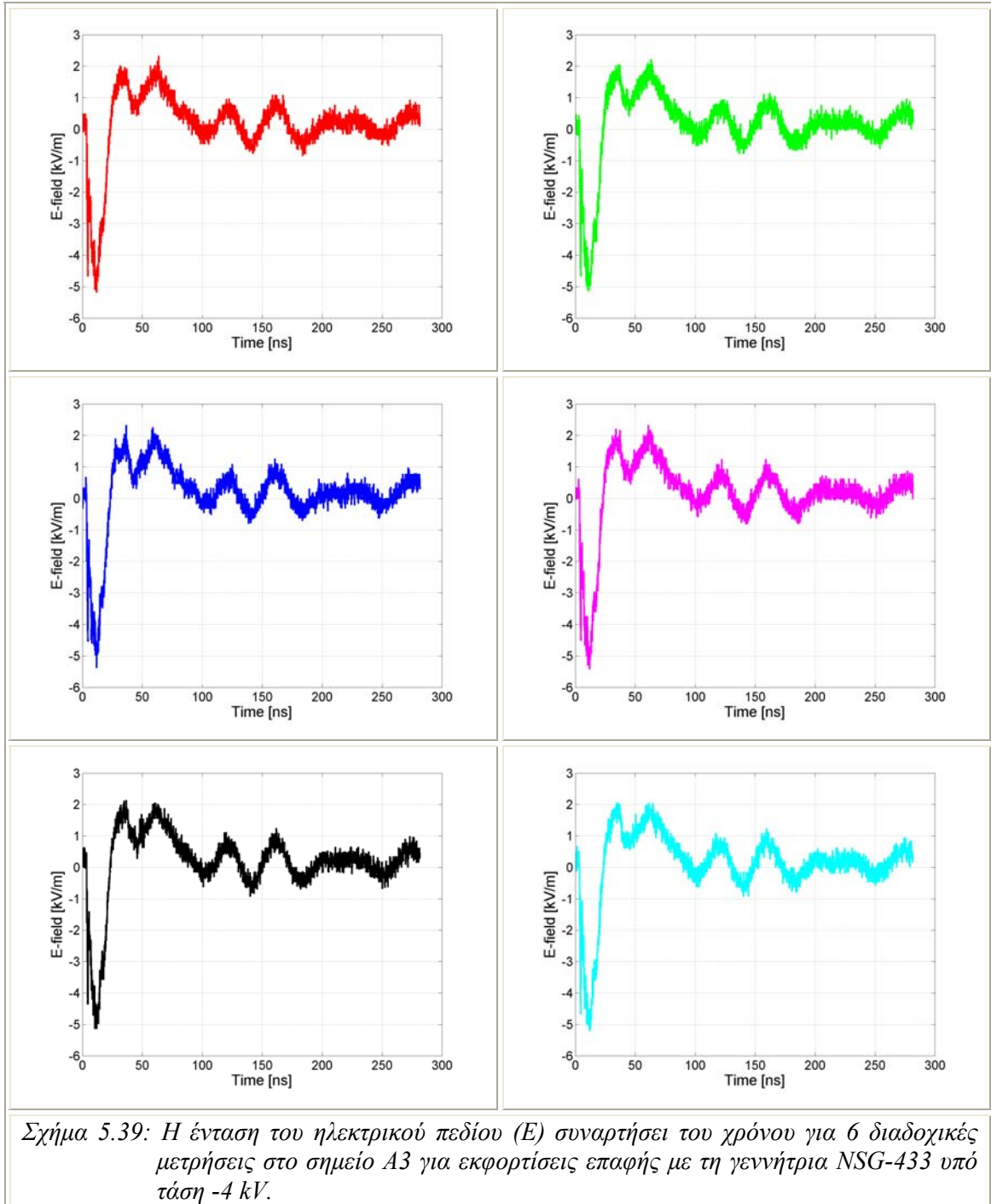


Σχήμα 5.37: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο A1 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση -4 kV.

- Σημείο A2 (35 cm)

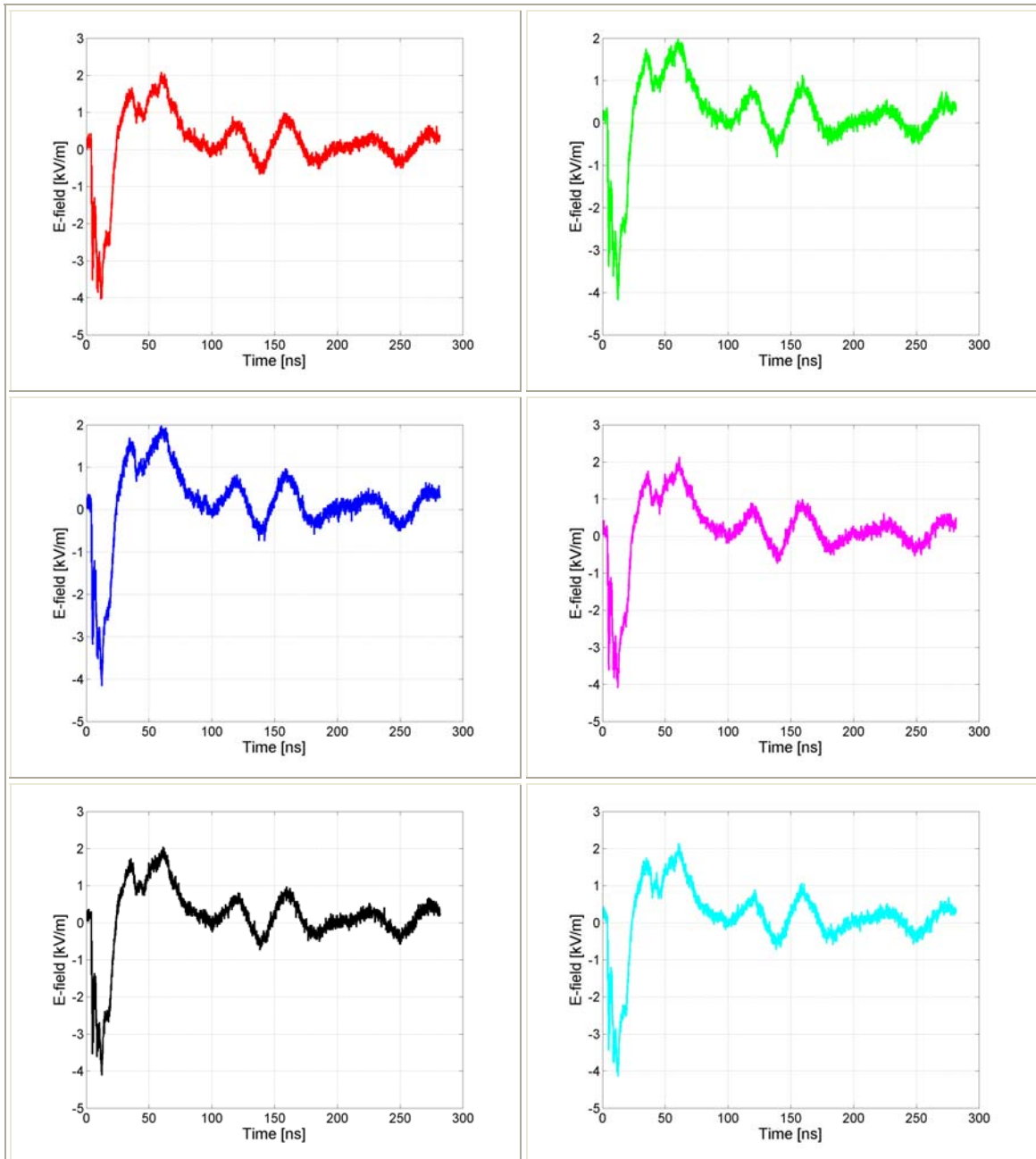


- Σημείο A3 (50 cm)



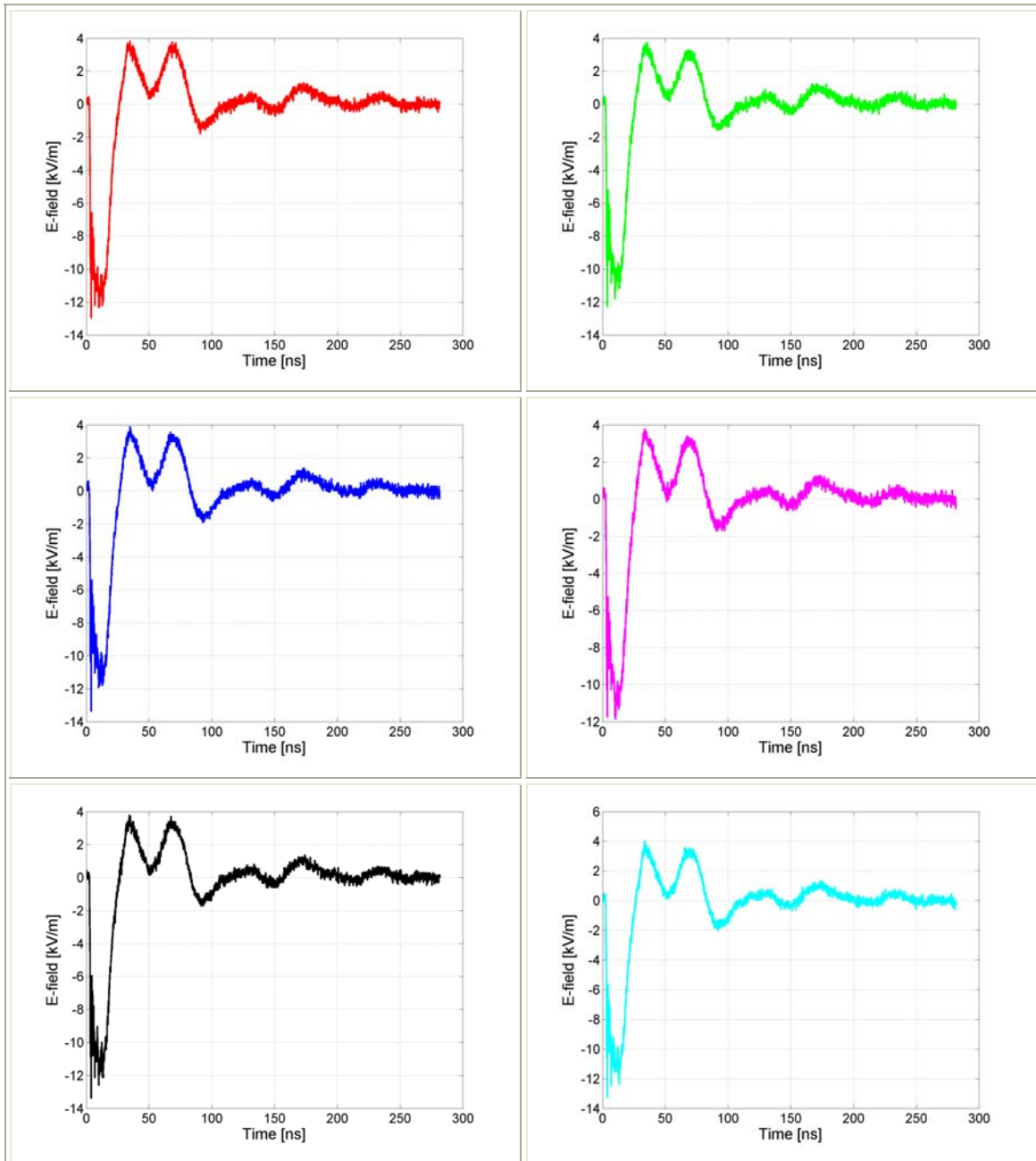
Σχήμα 5.39: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο A3 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση  $-4$  kV.

- Σημείο A4 (65 cm)



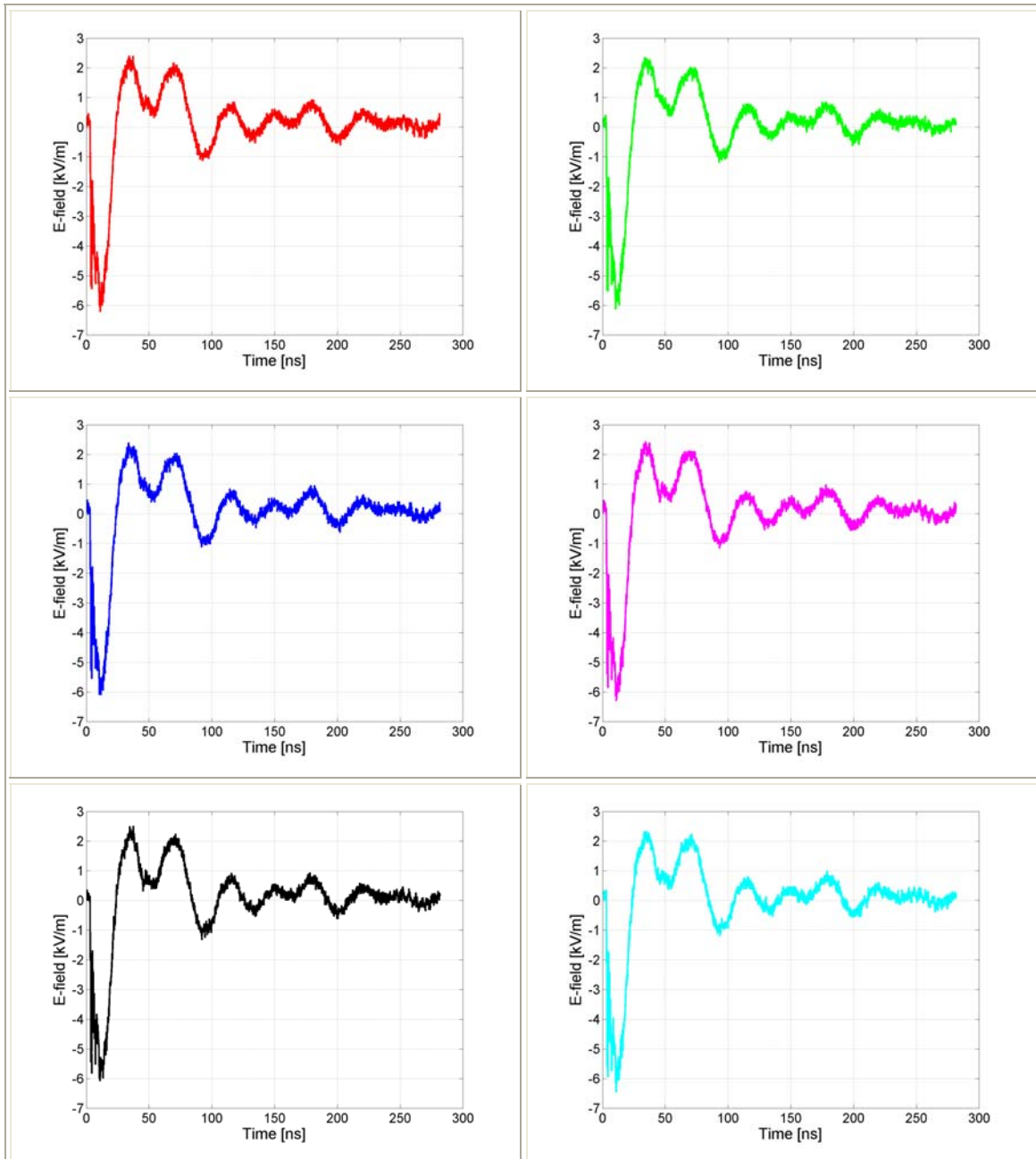
Σχήμα 5.40: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο A4 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση  $-4$  kV.

- Σημείο C1 (20 cm)



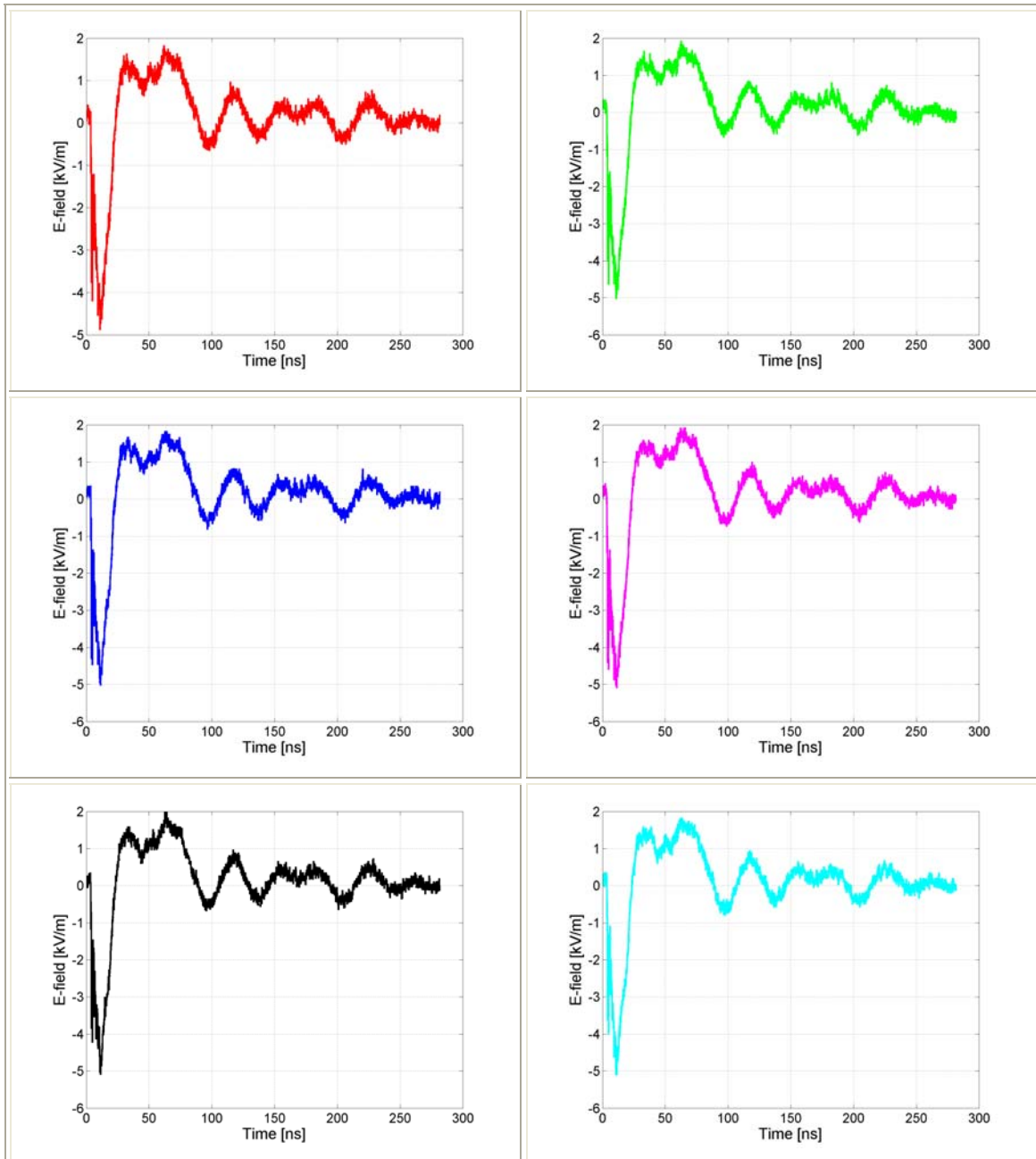
Σχήμα 5.41: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο C1 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση  $-4$  kV.

- Σημείο C2 (35 cm)



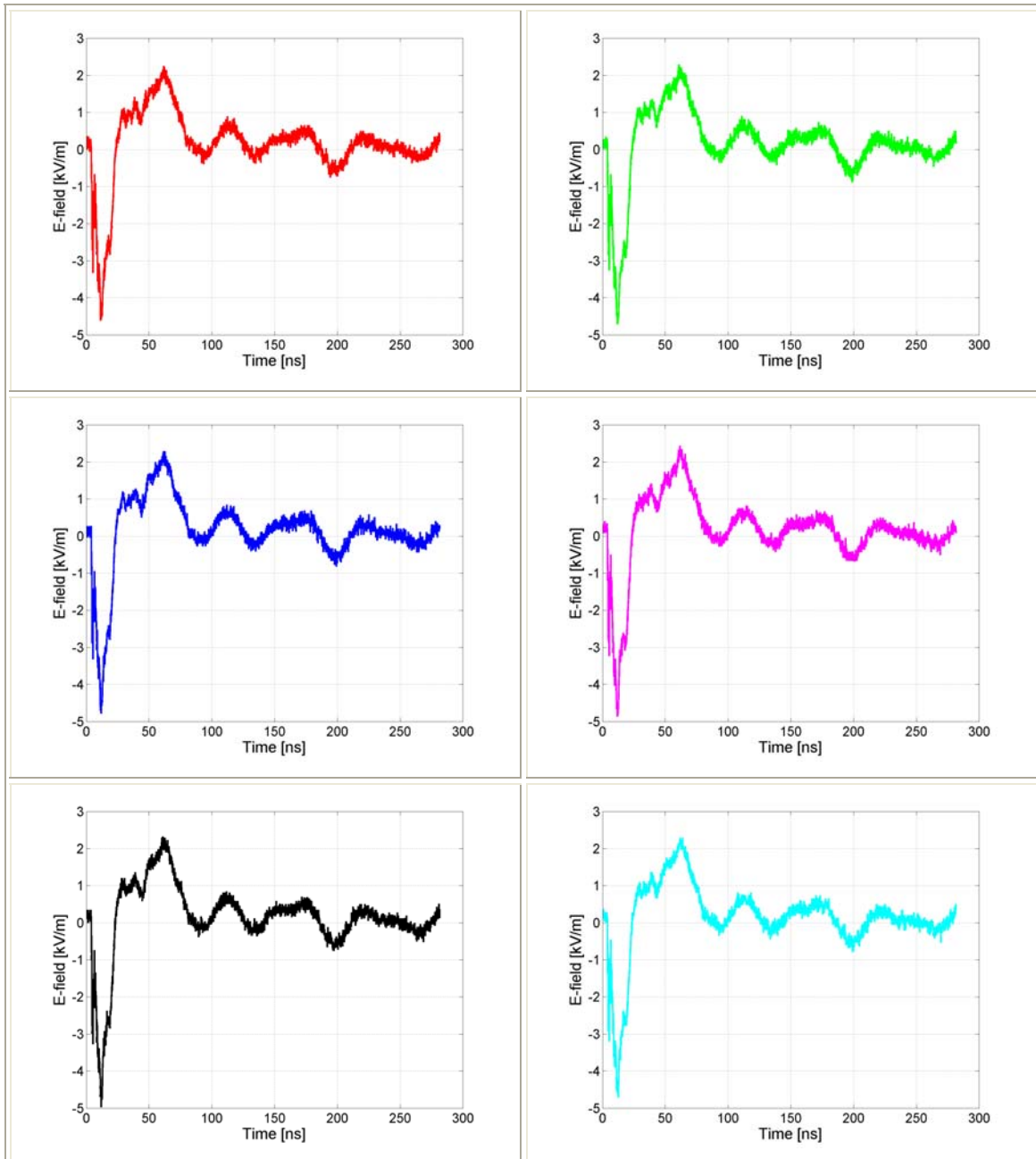
Σχήμα 5.42: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο C2 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση  $-4$  kV.

- Σημείο C3 (50 cm)



Σχήμα 5.43: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο C3 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση  $-4$  kV.

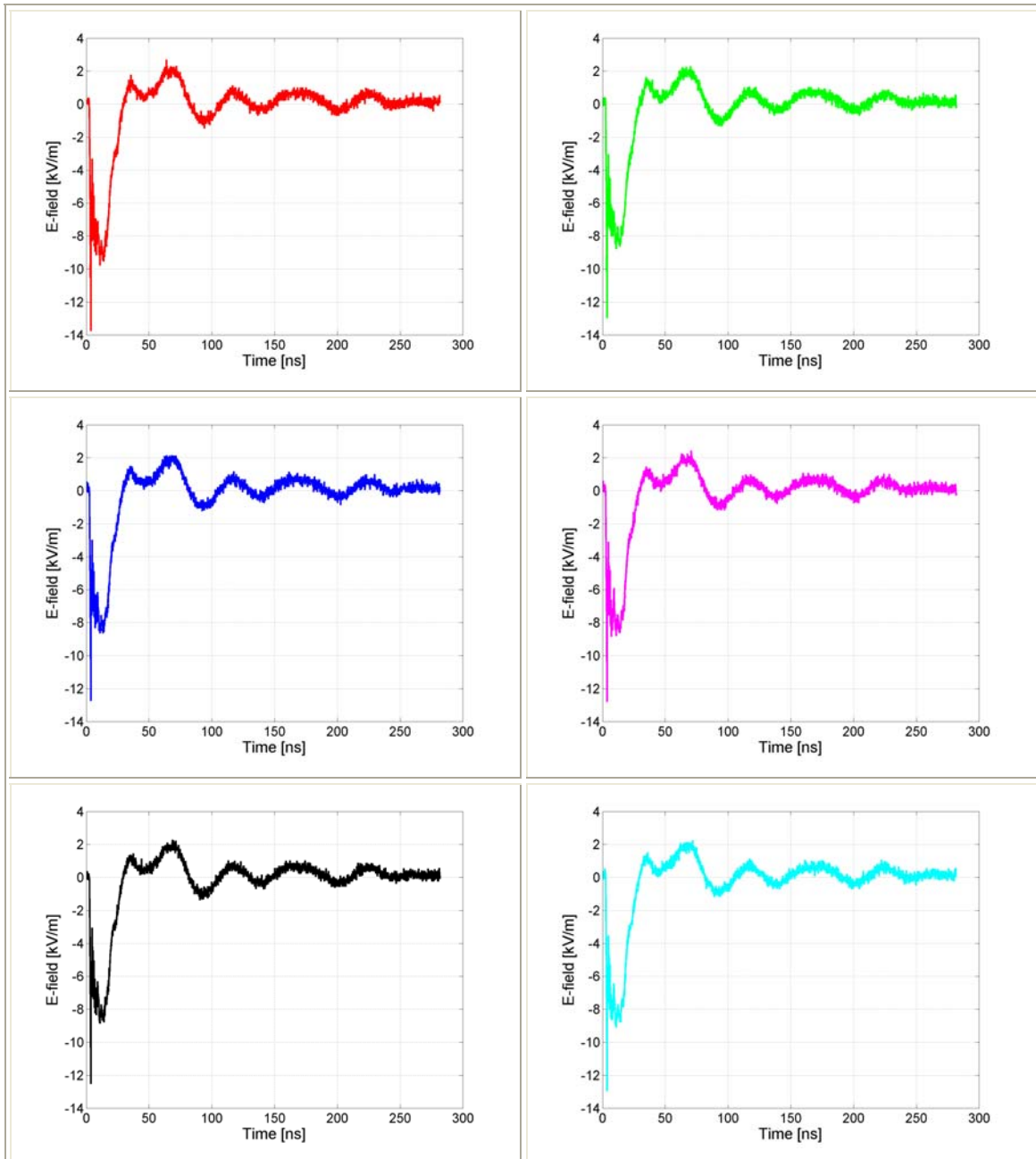
- Σημείο C4 (65 cm)



Σχήμα 5.44: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο C4 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση  $-4$  kV.

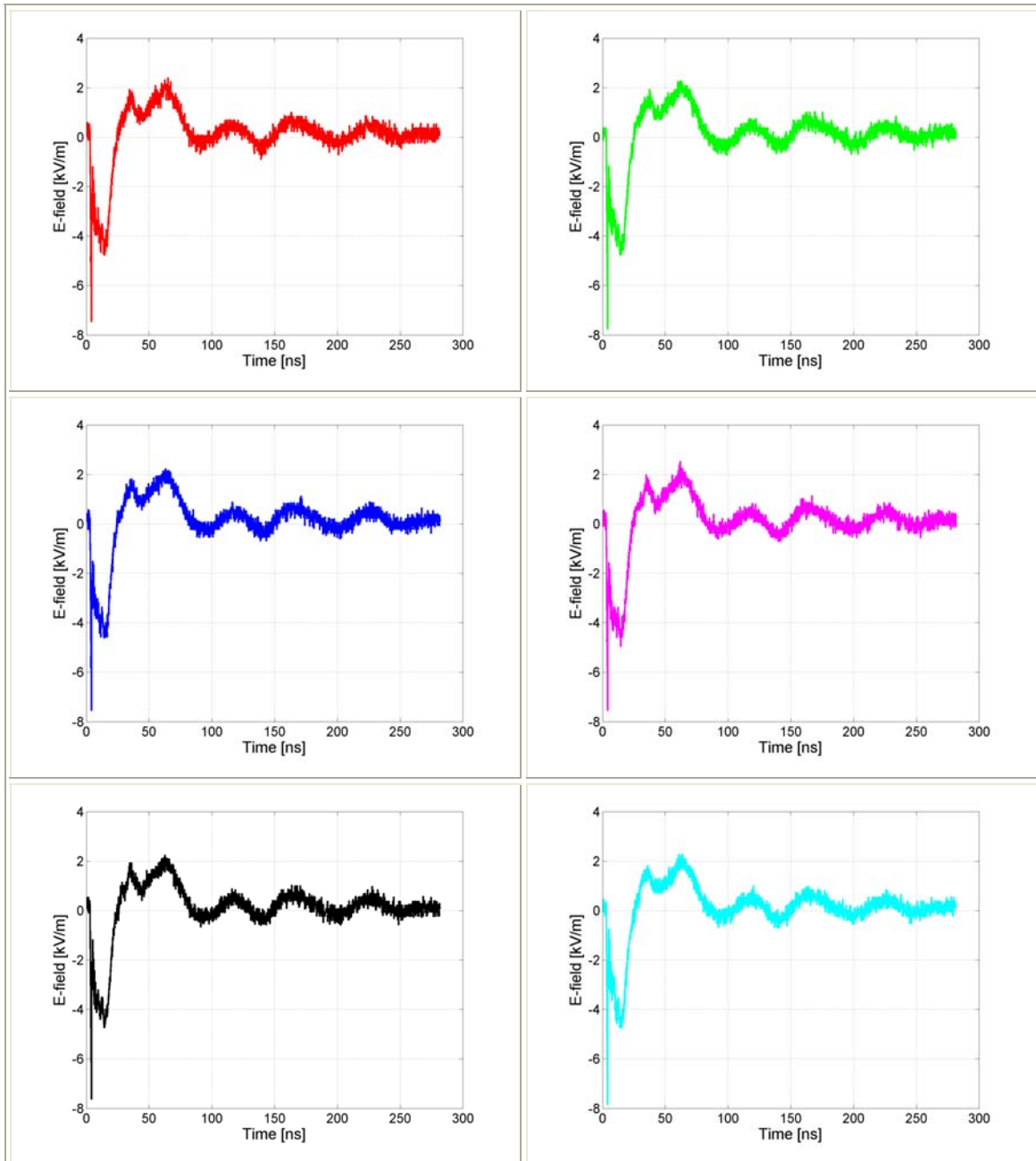


- Σημείο D1 (20 cm)



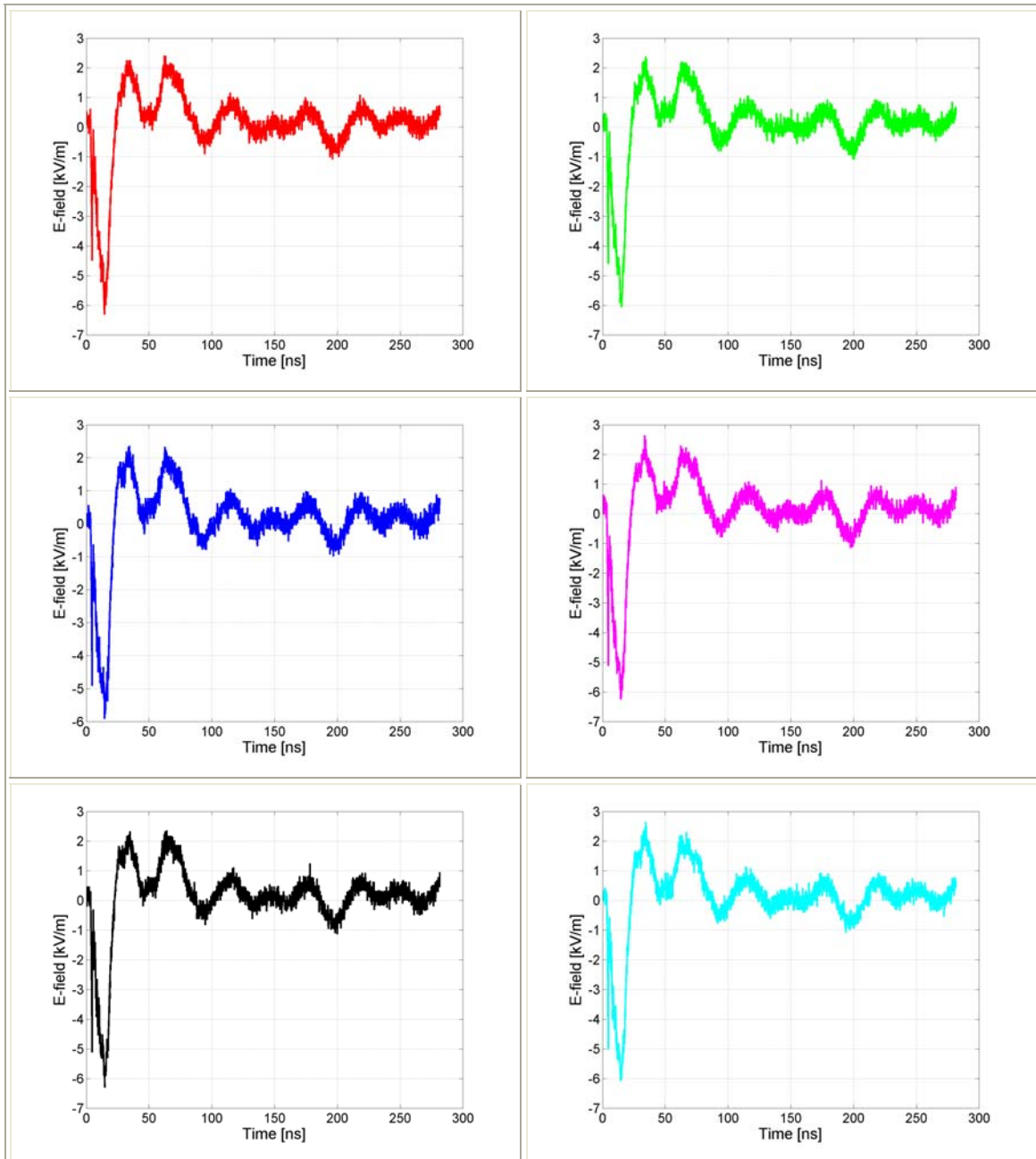
Σχήμα 5.45: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο D1 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση  $-4$  kV.

- Σημείο D2 (35 cm)



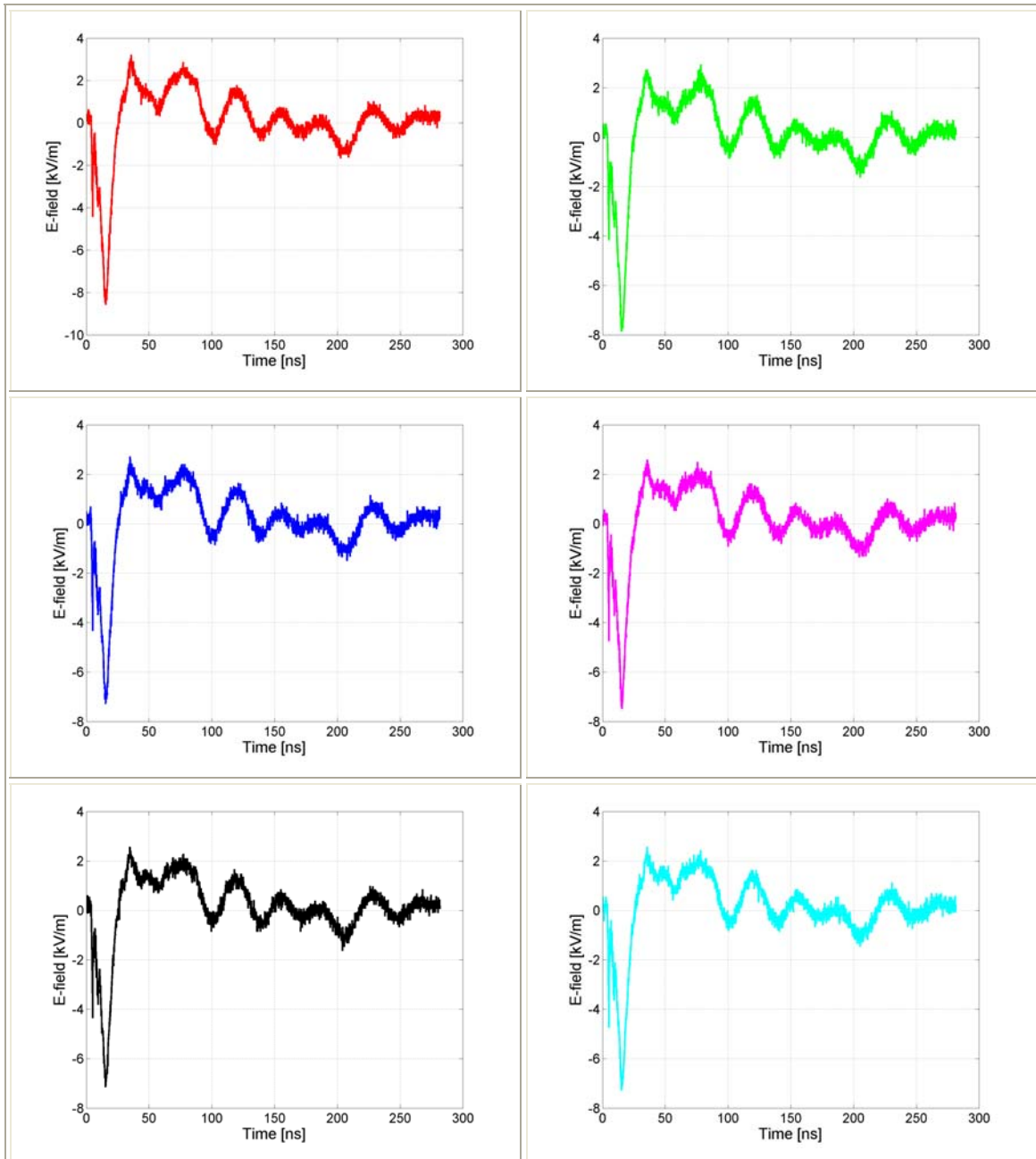
Σχήμα 5.46: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο D2 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση  $-4$  kV.

- Σημείο D3 (50 cm)



Σχήμα 5.47: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο D3 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση  $-4$  kV.

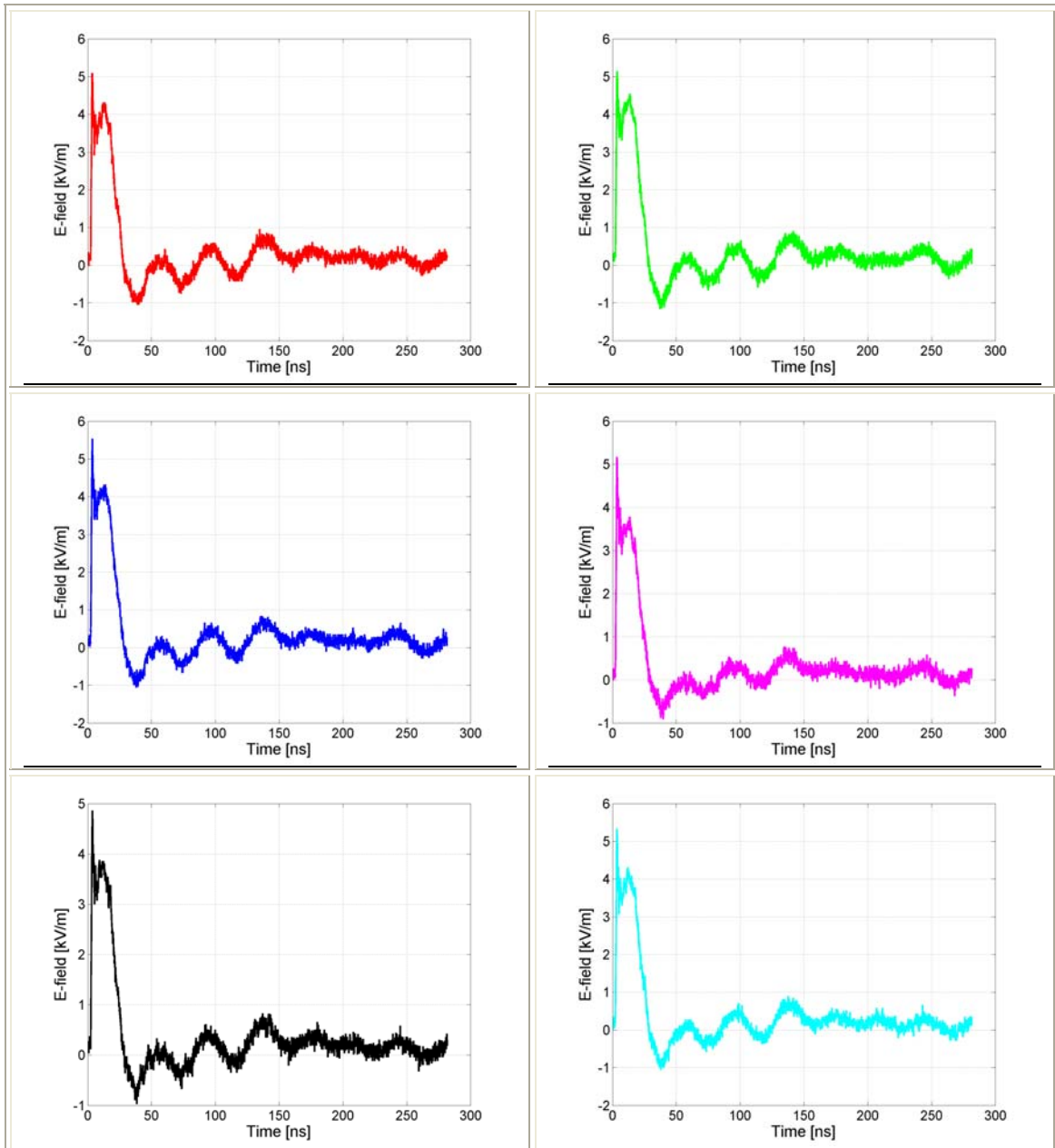
- Σημείο D4 (65 cm)



Σχήμα 5.48: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο D4 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση  $-4$  kV.

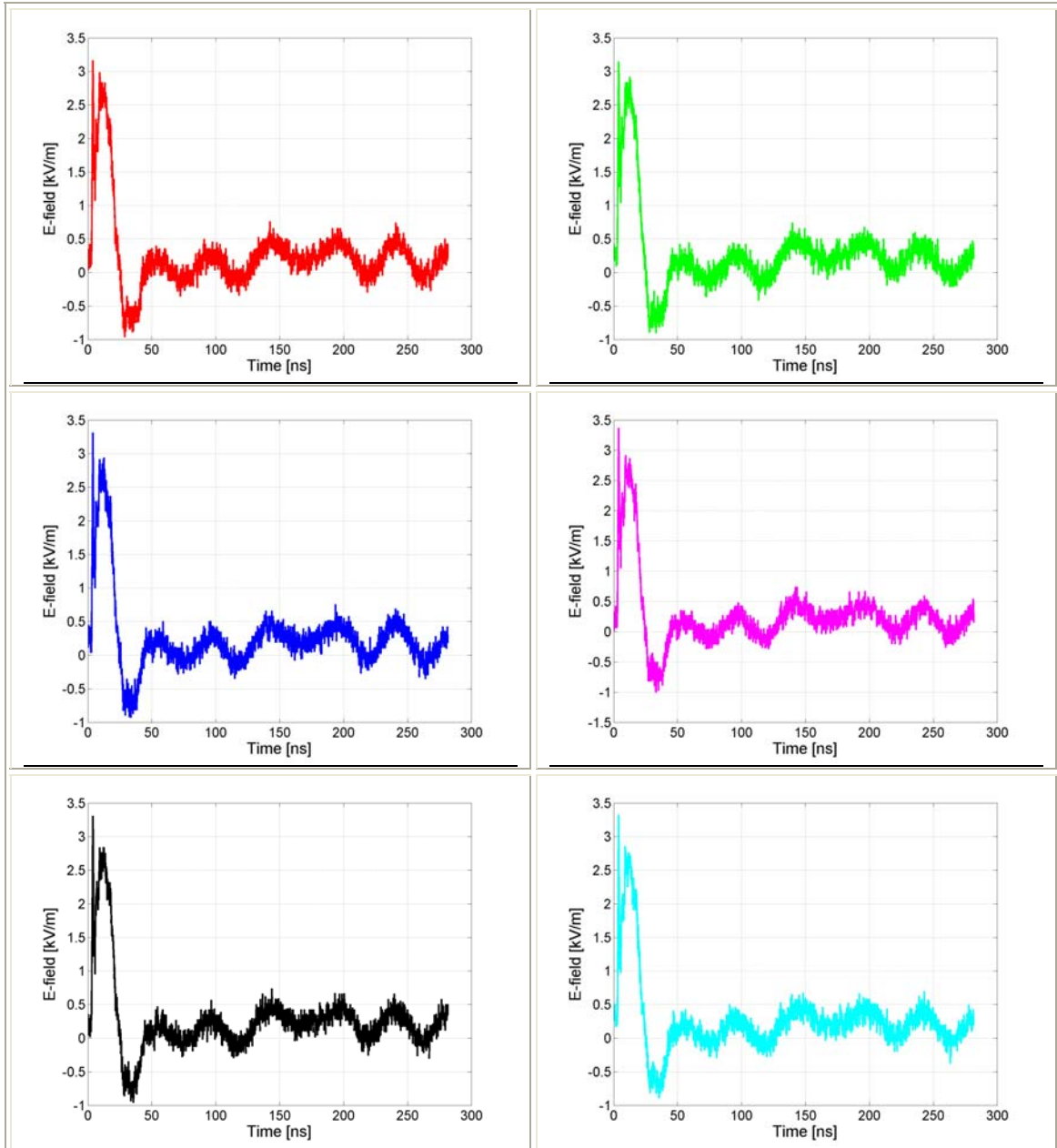
### 5.2.5 Εκφορτίσεις επαφής υπό τάση 2 kV με τη γεννήτρια NSG-438

- Σημείο A1 (20 cm)



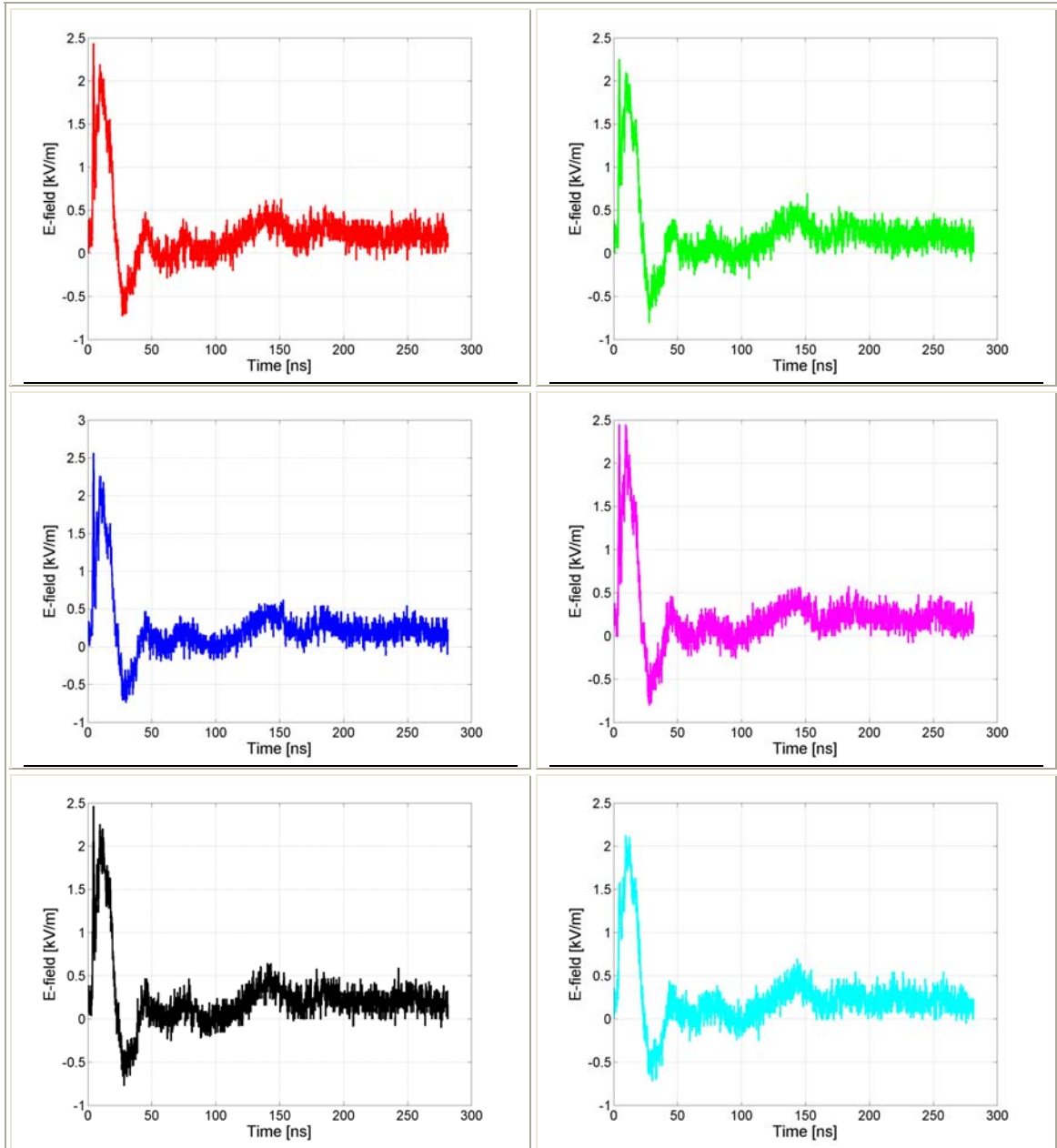
Σχήμα 5.49: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο A1 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση 2kV.

- Σημείο A2 (35 cm)



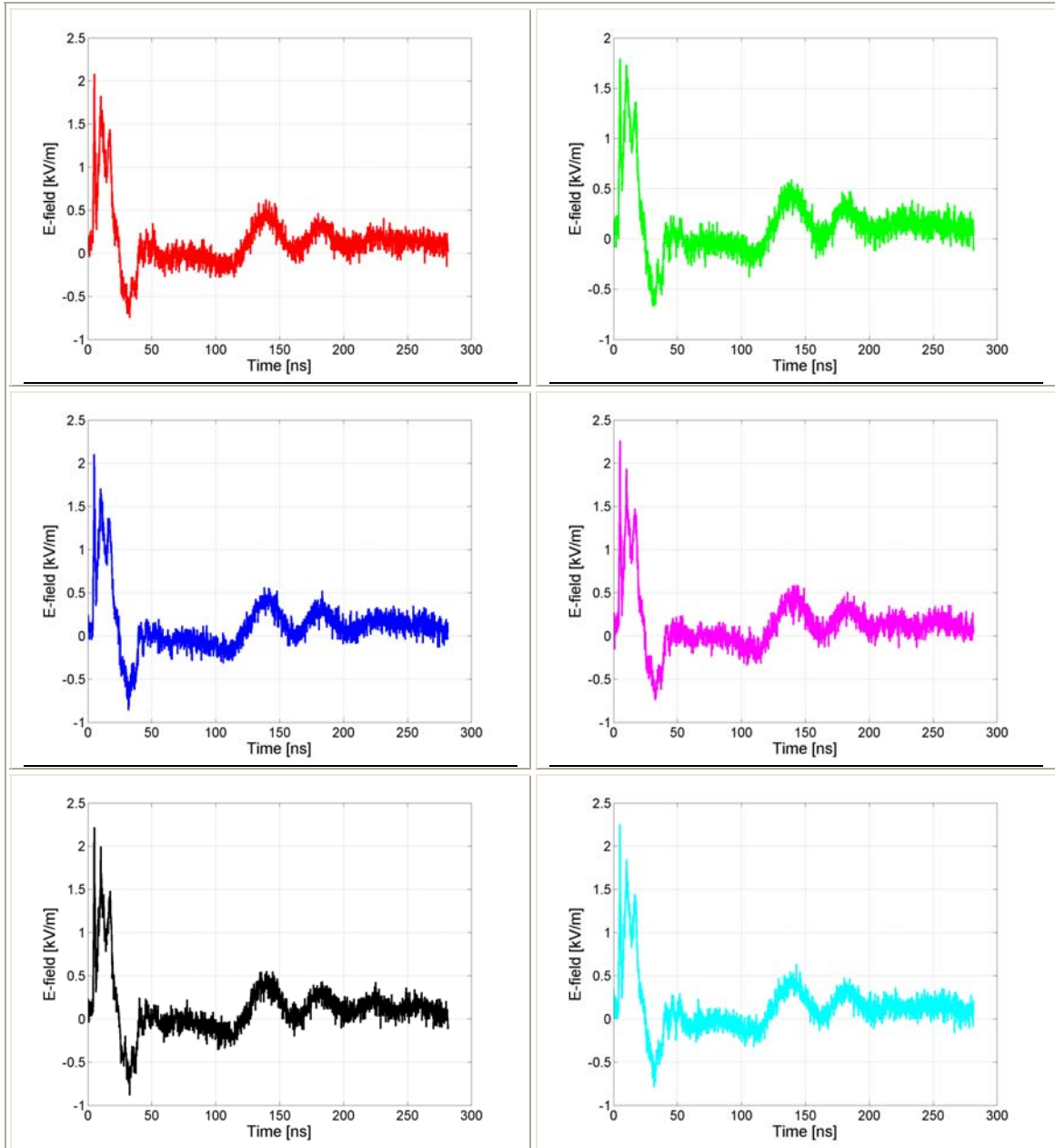
Σχήμα 5.50: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο A2 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση 2kV.

- Σημείο A3 (50 cm)



Σχήμα 5.51: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου (E) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο A3 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση 2kV.

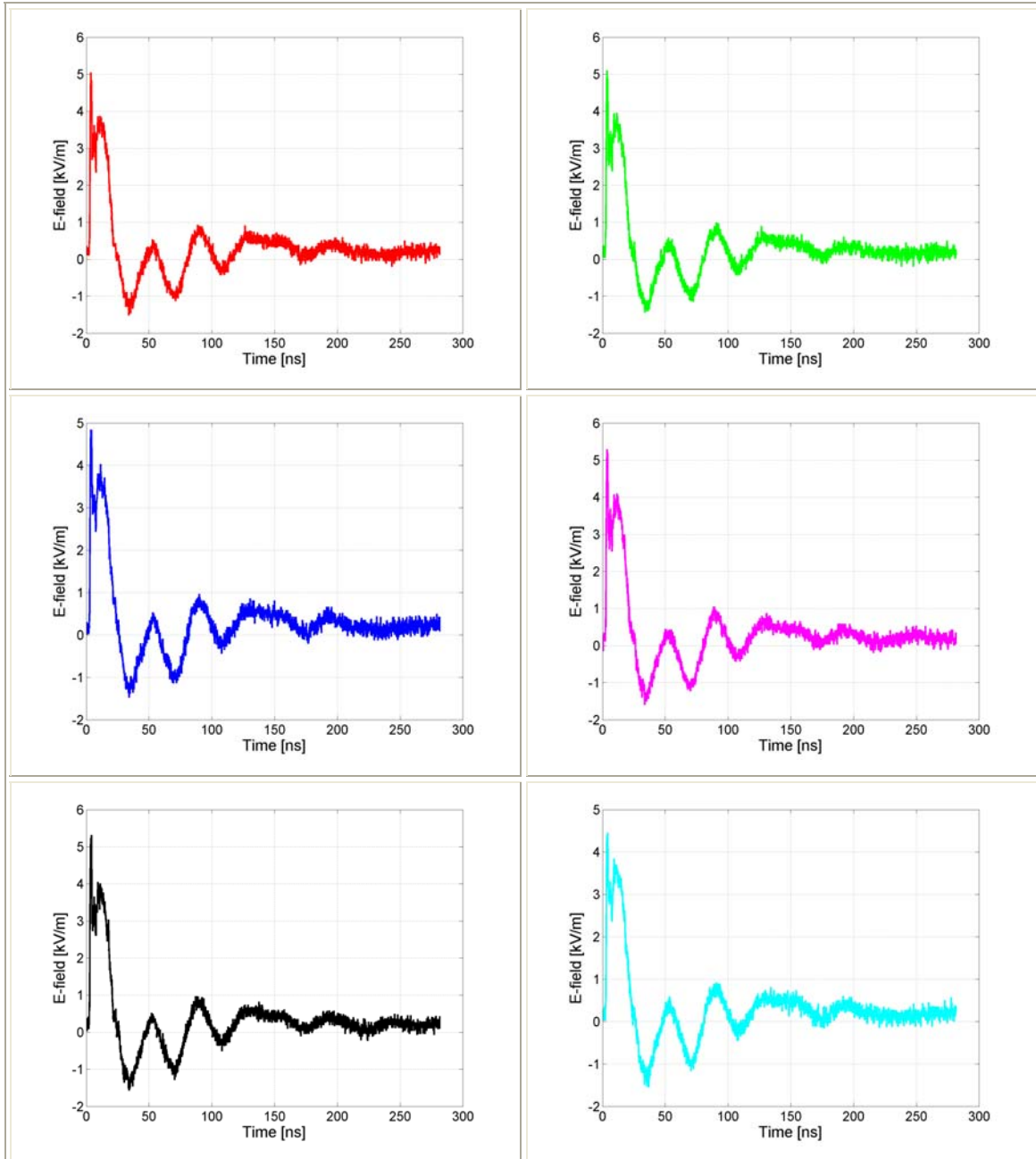
- Σημείο A4 (65 cm)



Σχήμα 5.52: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο A4 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση 2kV.

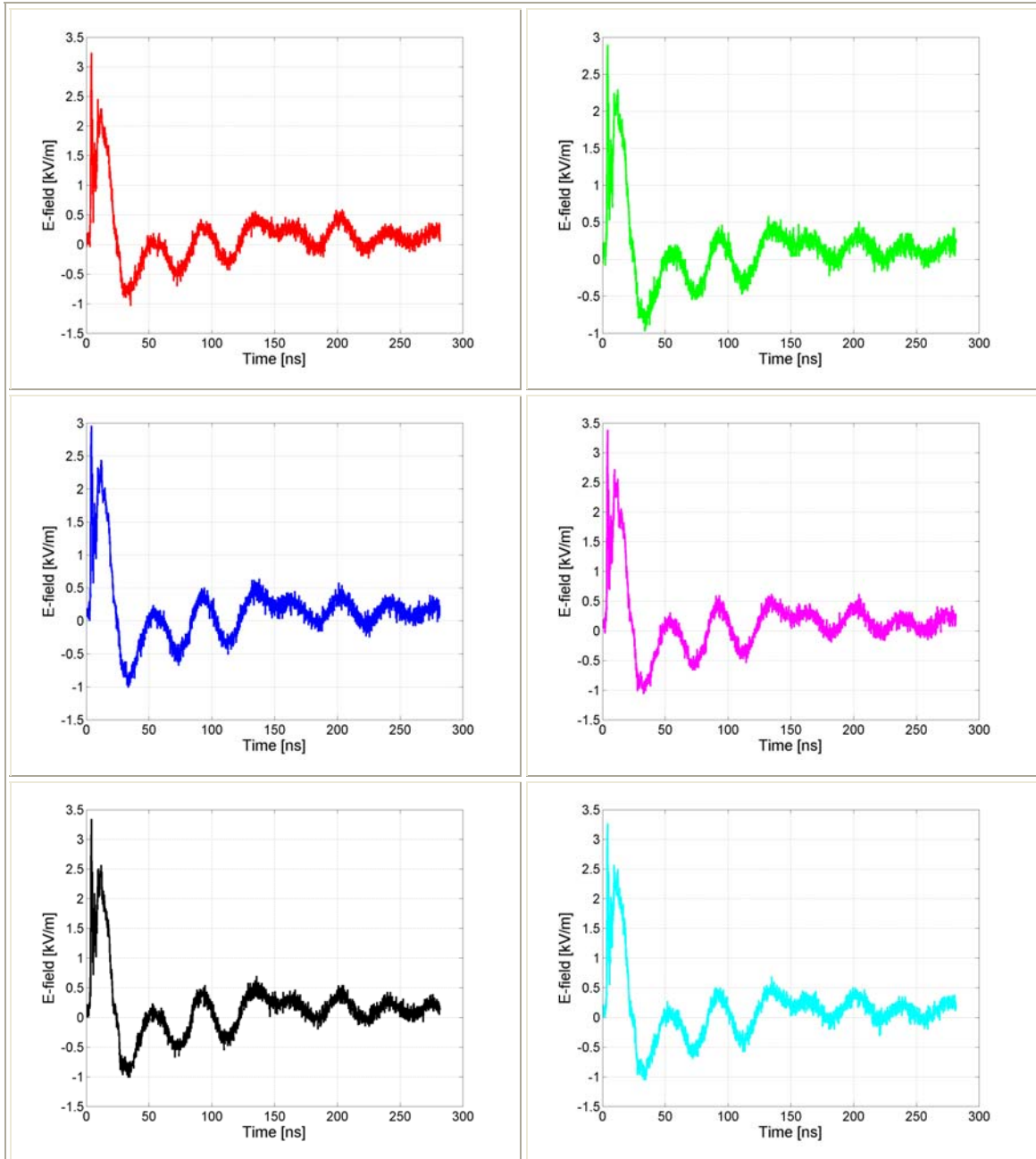


- Σημείο C1 (20 cm)



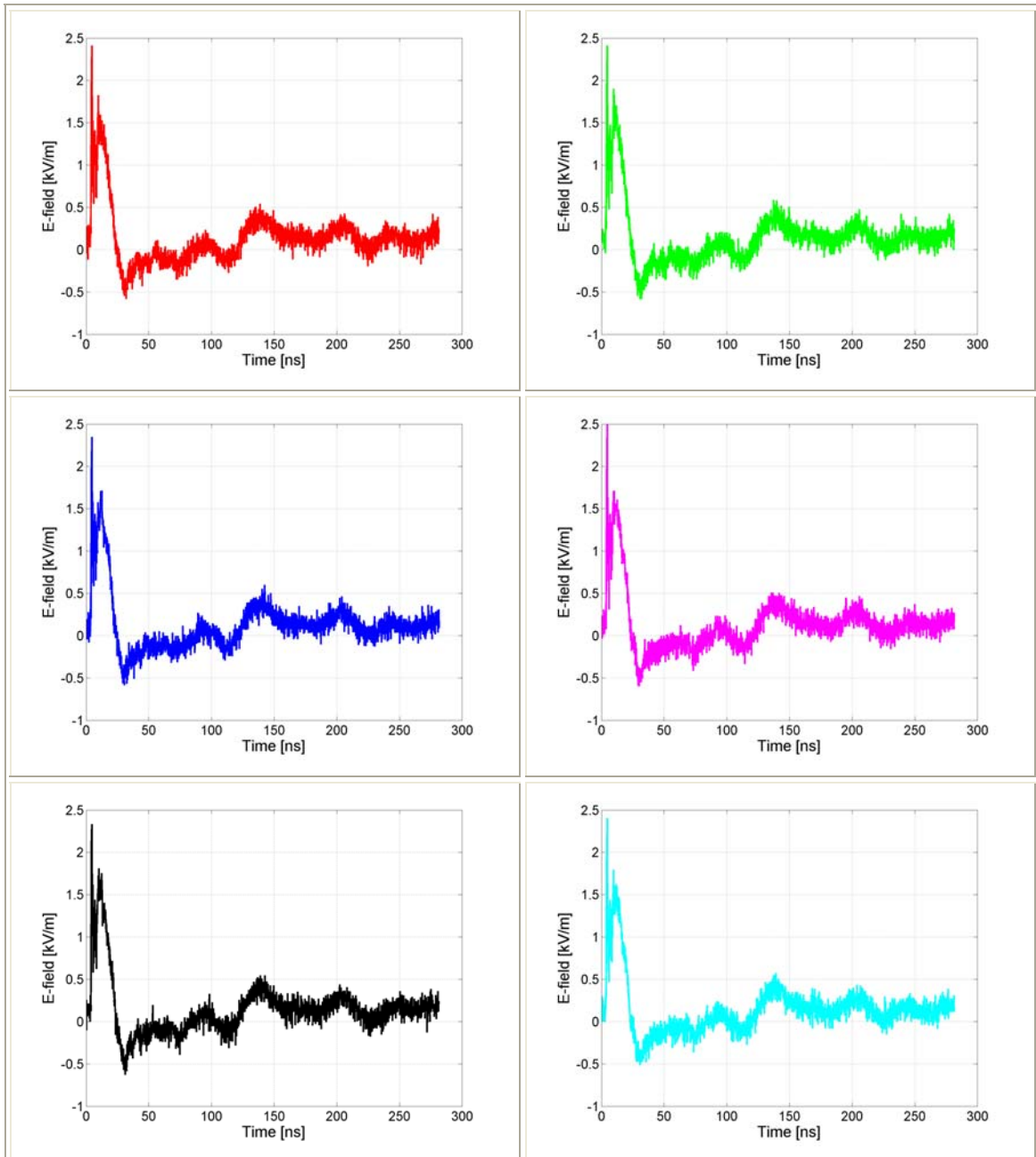
Σχήμα 5.53: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο C1 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση 2 kV.

- Σημείο C2 (35 cm)



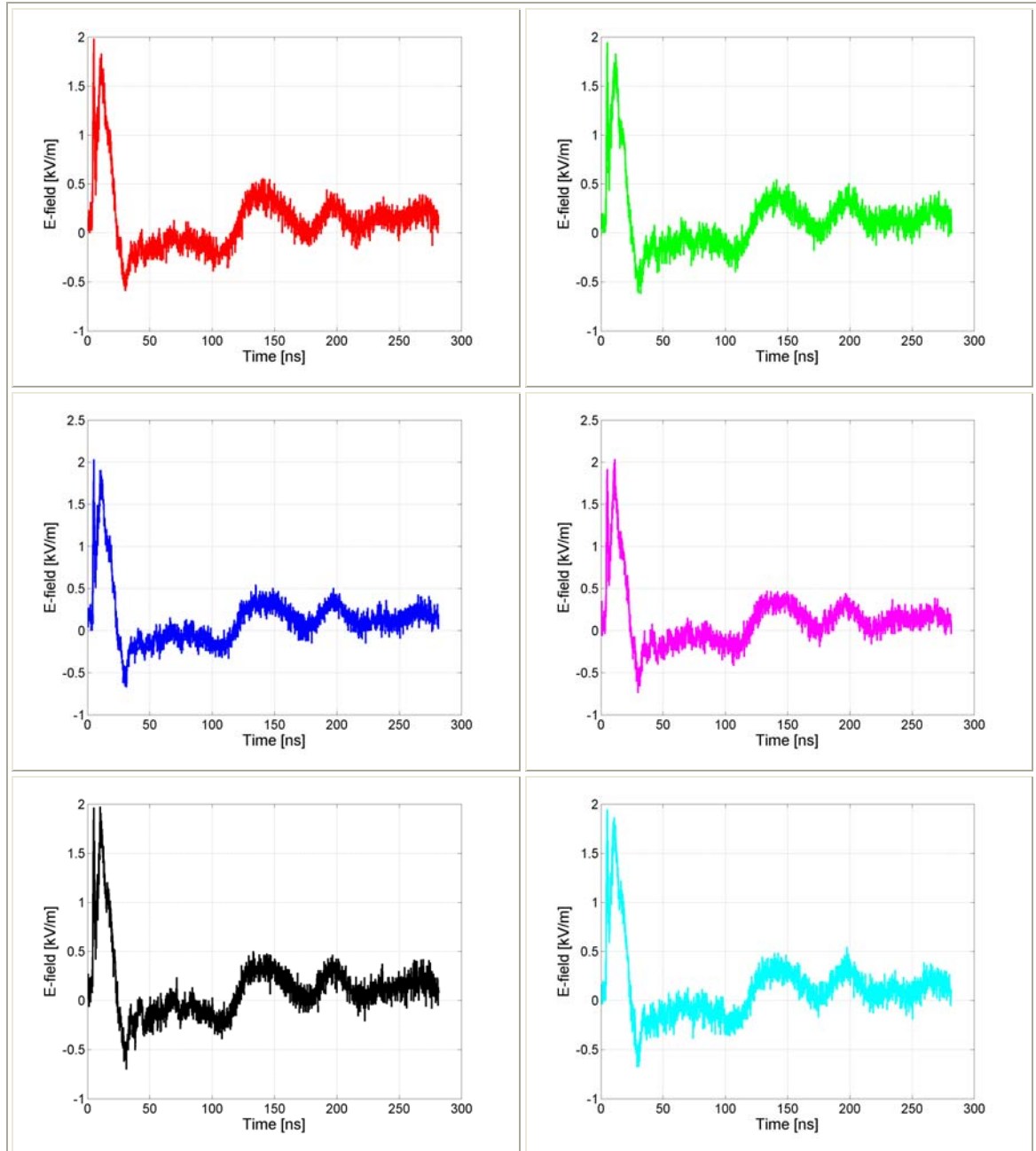
Σχήμα 5.54: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο C2 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση 2 kV.

- Σημείο C3 (50 cm)



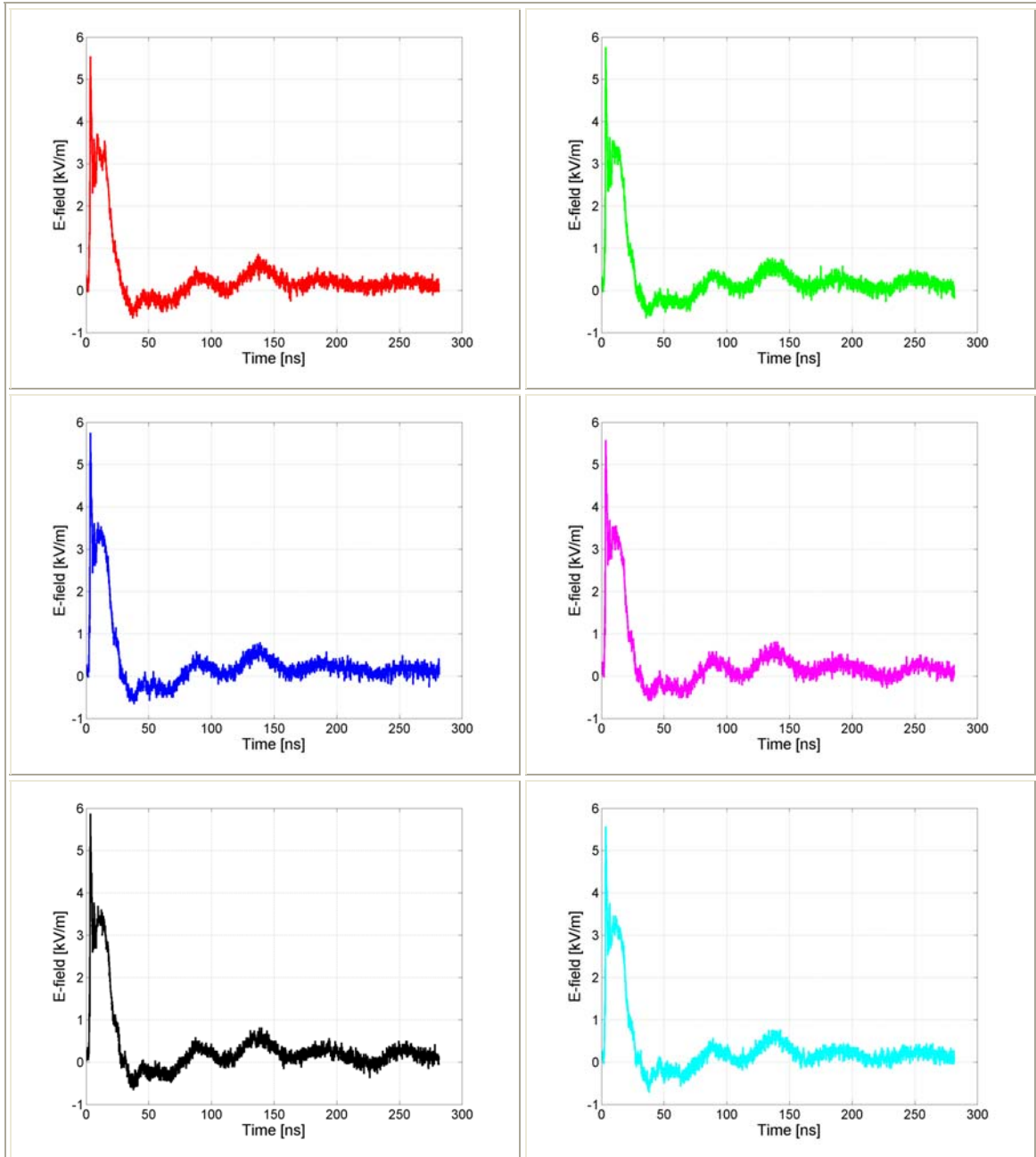
Σχήμα 5.55: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο C3 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση 2 kV.

- Σημείο C4 (65 cm)



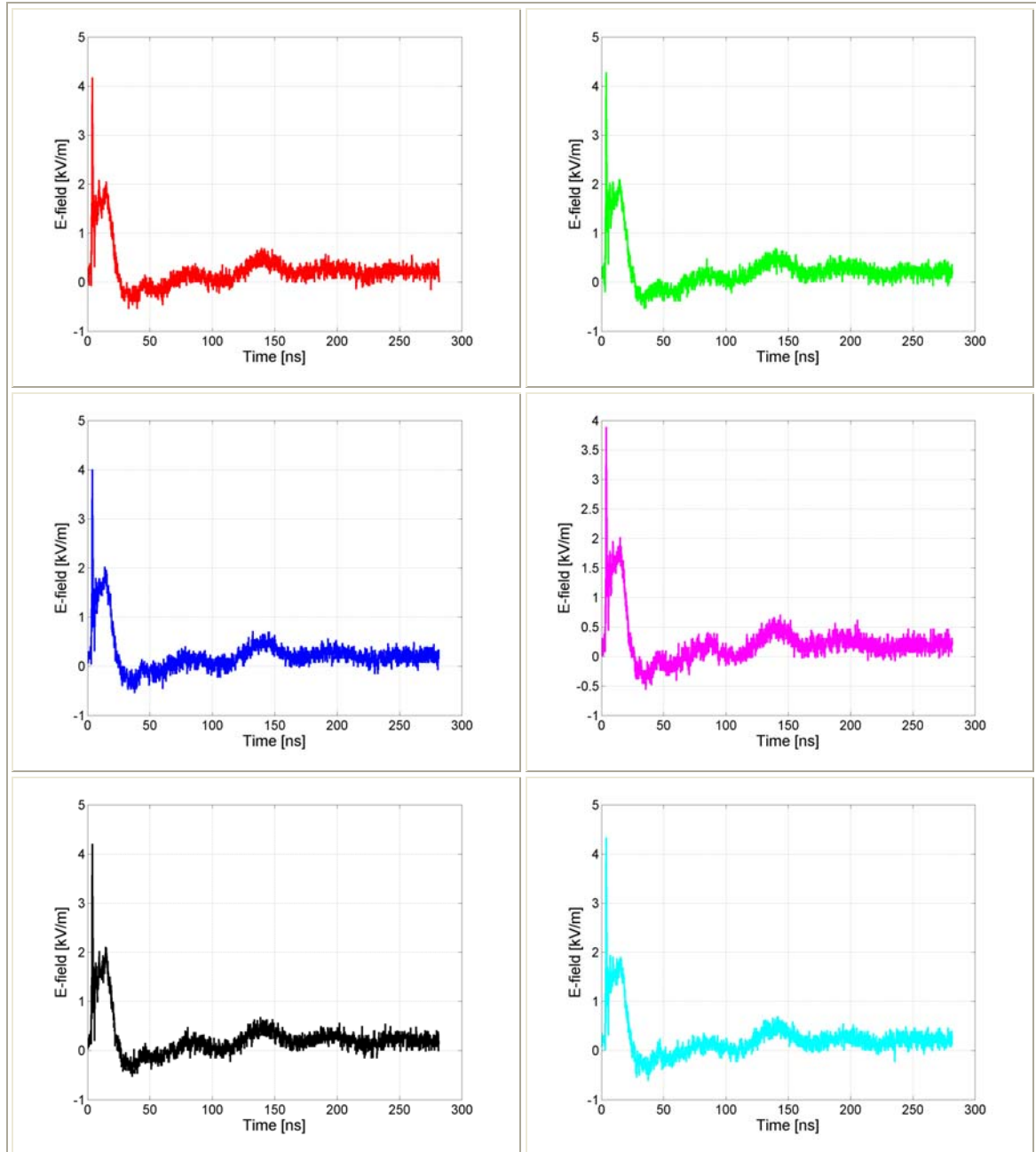
Σχήμα 5.56: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο C4 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση 2 kV.

- Σημείο D1 (20 cm)



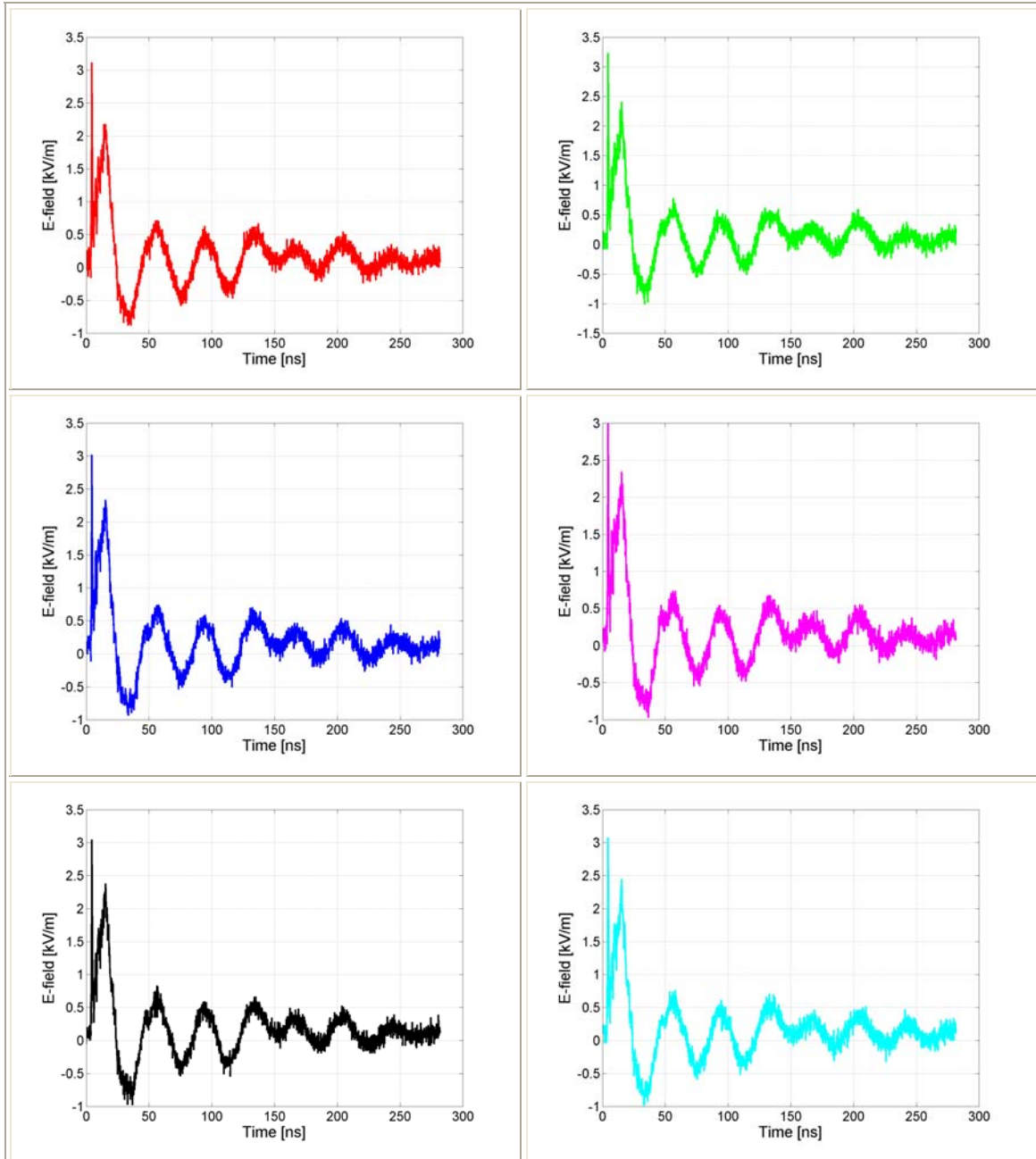
Σχήμα 5.57: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο D1 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση 2 kV.

- Σημείο D2 (35 cm)



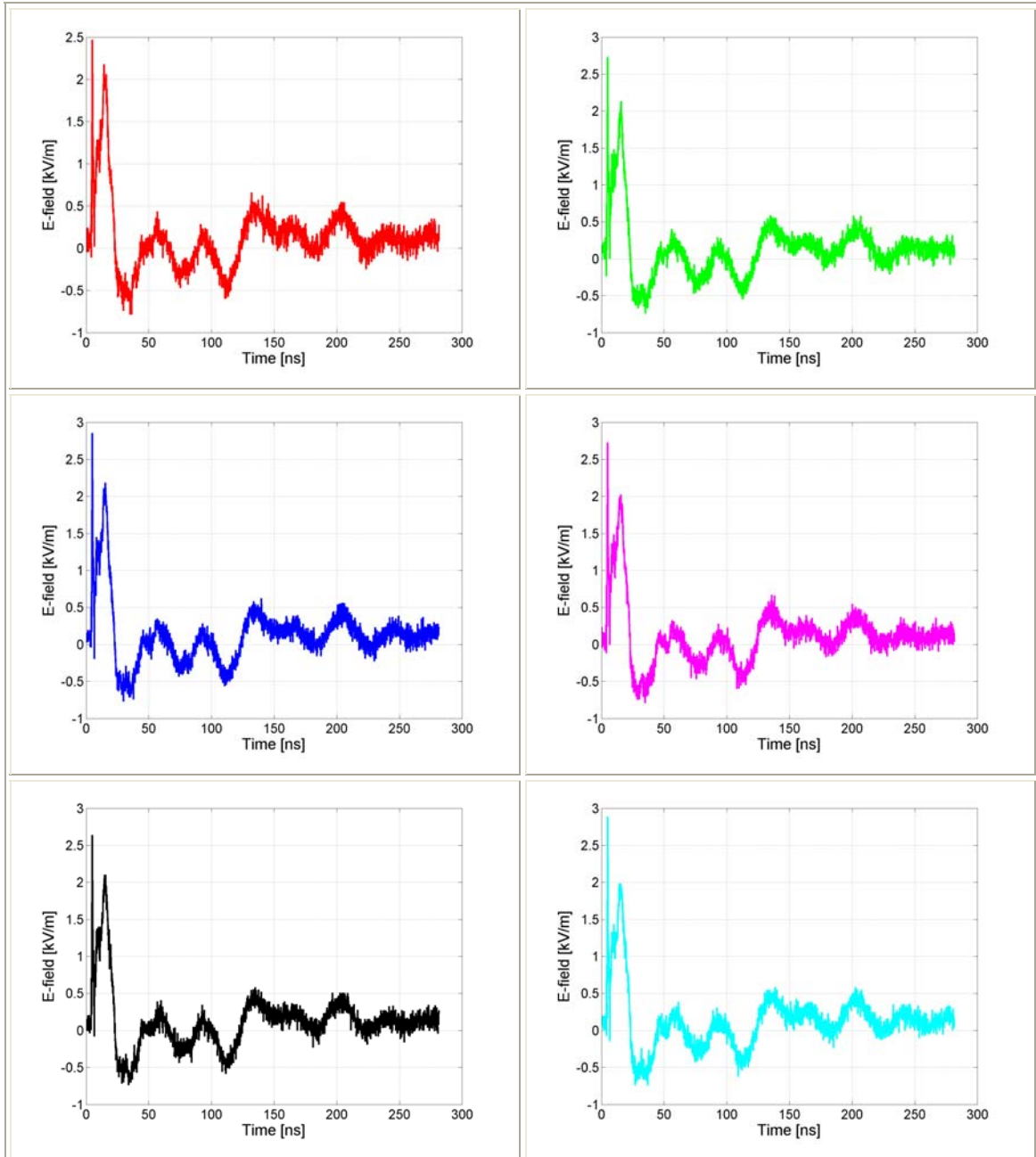
Σχήμα 5.58: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο D2 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση 2 kV.

- Σημείο D3 (50 cm)



Σχήμα 5.59: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο D3 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση 2 kV.

- Σημείο D4 (65 cm)

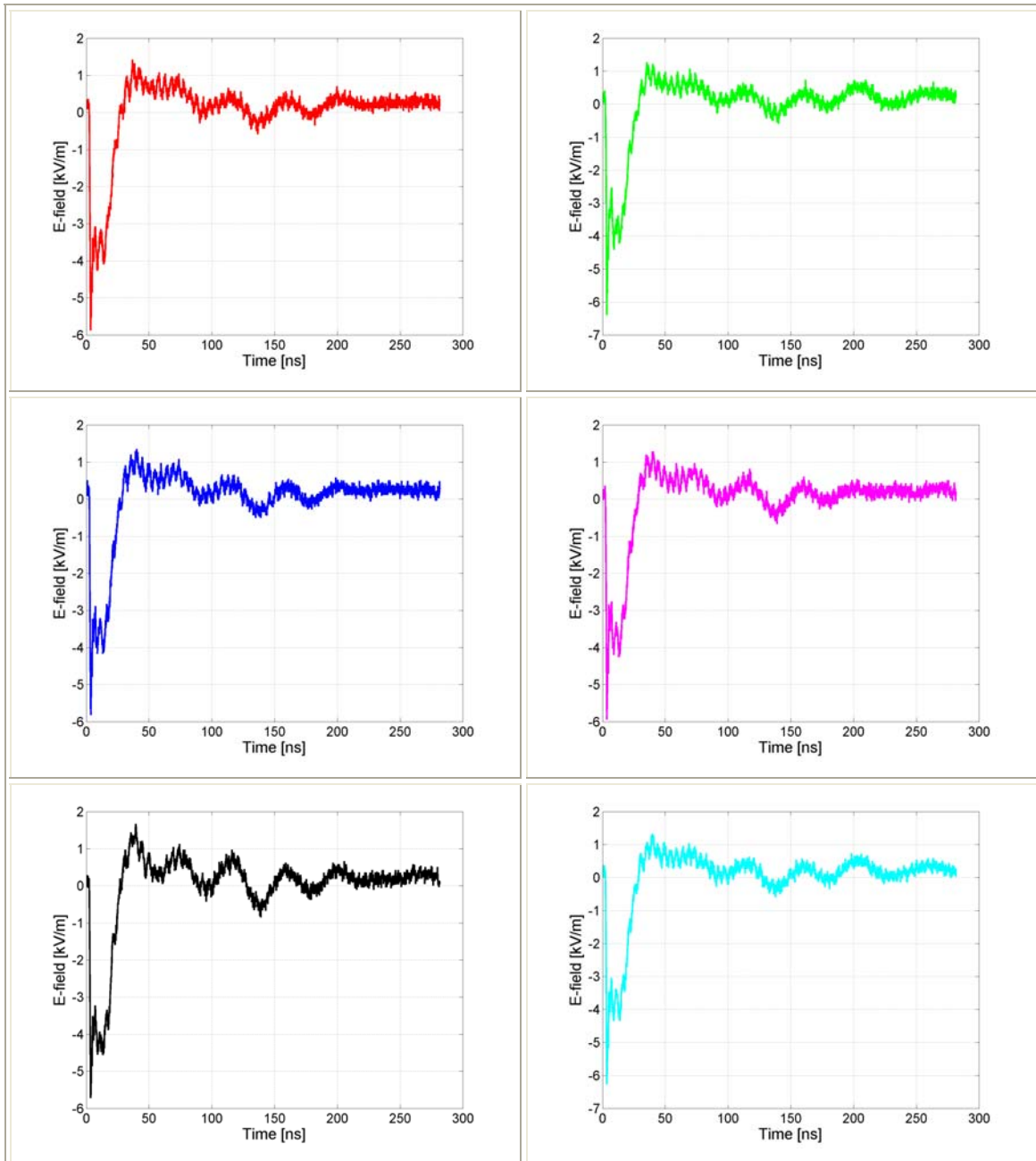


Σχήμα 5.60: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο D4 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση 2 kV.



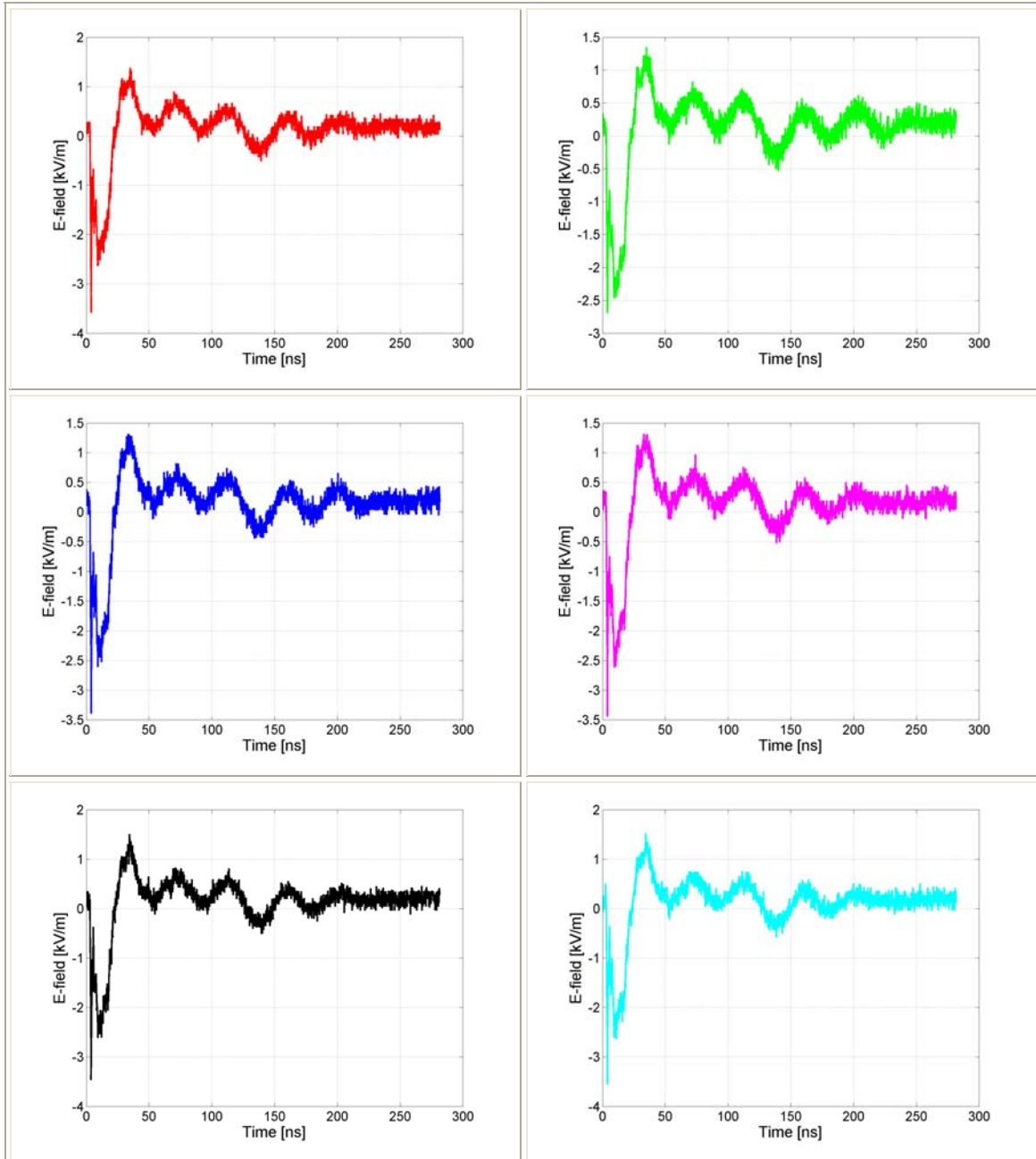
### 5.2.6 Εκφορτίσεις επαφής υπό τάση -2 kV με τη γεννήτρια NSG-438

- Σημείο A1 (20 cm)



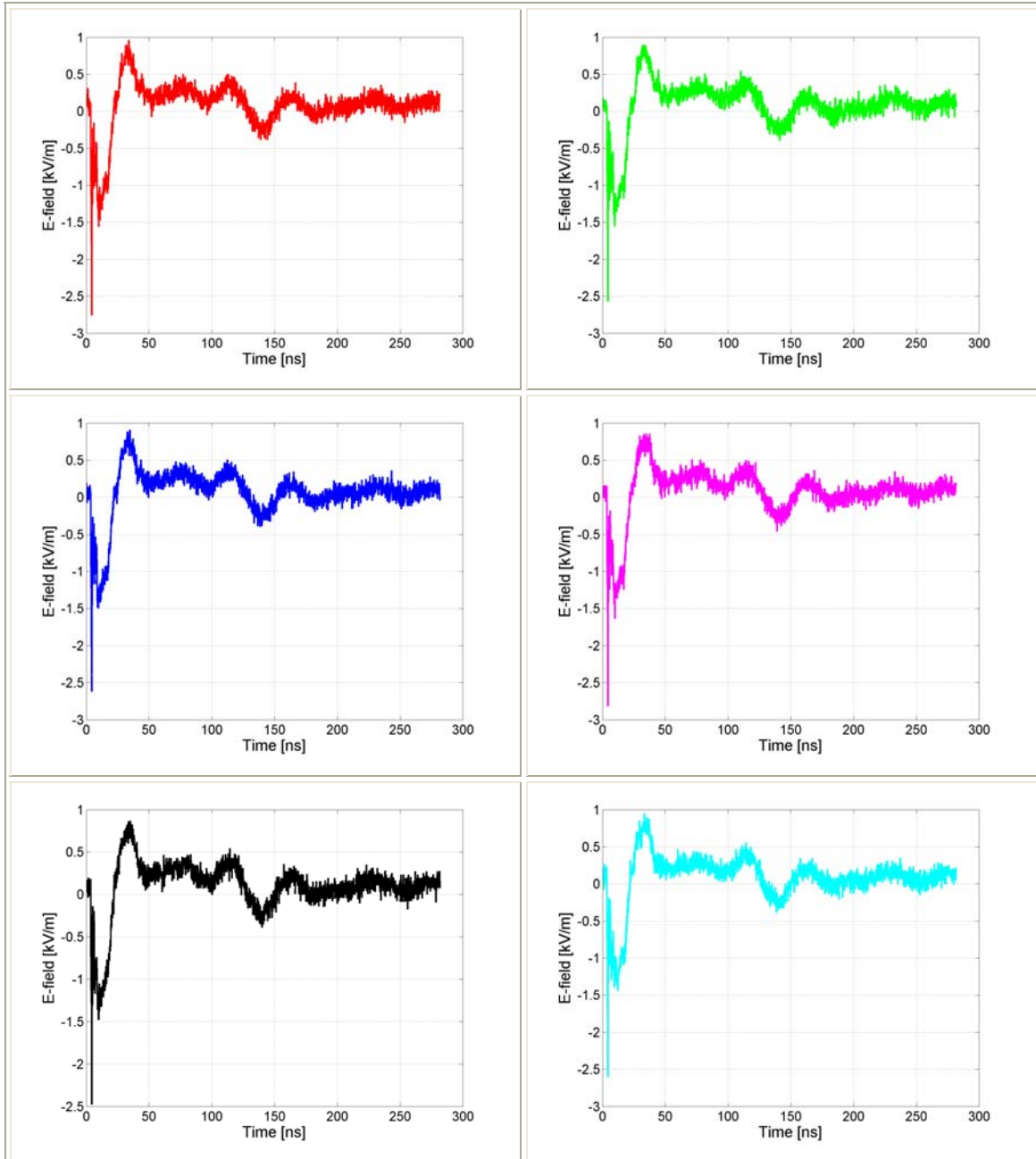
Σχήμα 5.61: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο A1 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση -2 kV.

- Σημείο A2 (35 cm)



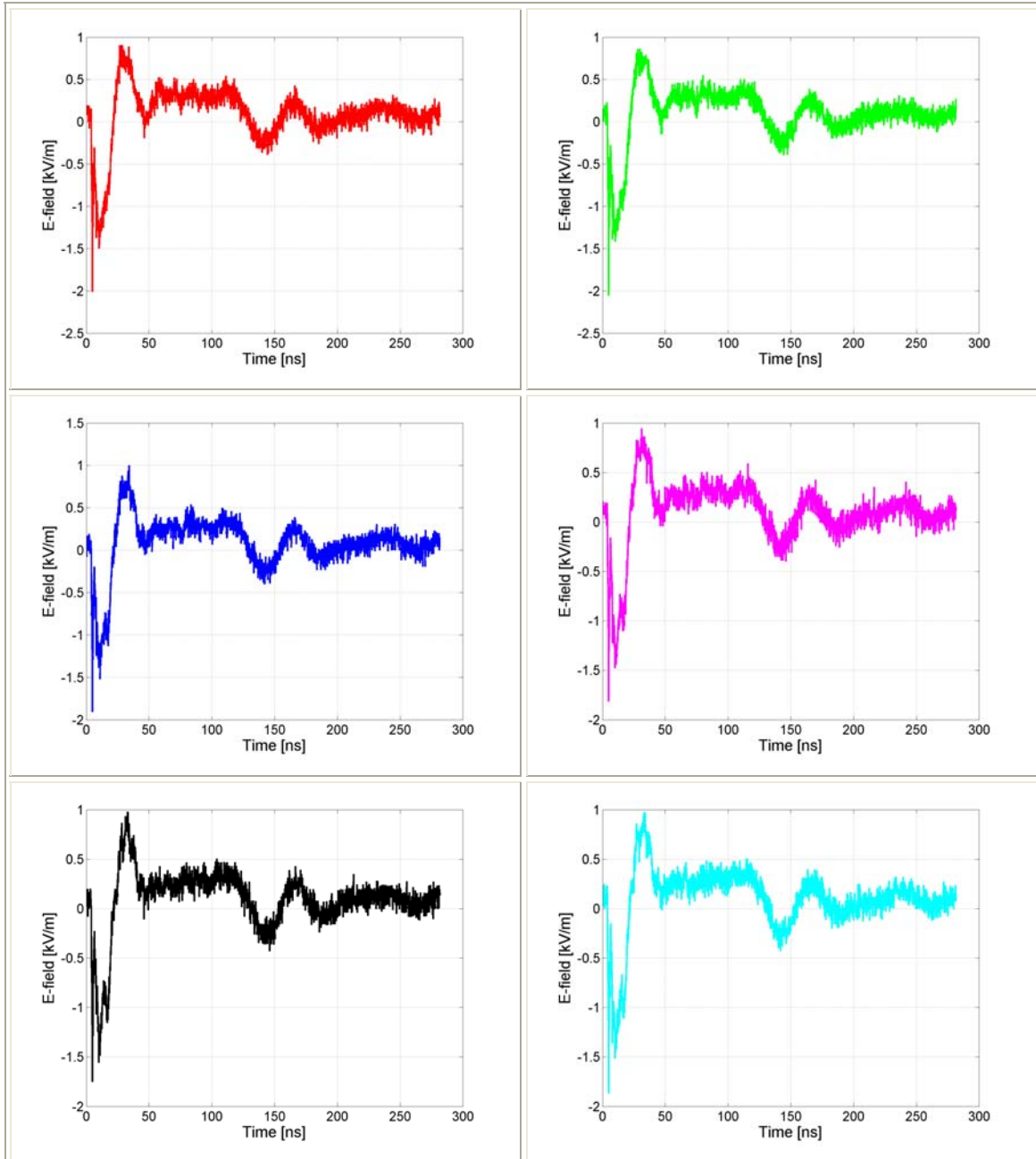
Σχήμα 5.62: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο A2 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση  $-2$  kV.

- Σημείο A3 (50 cm)



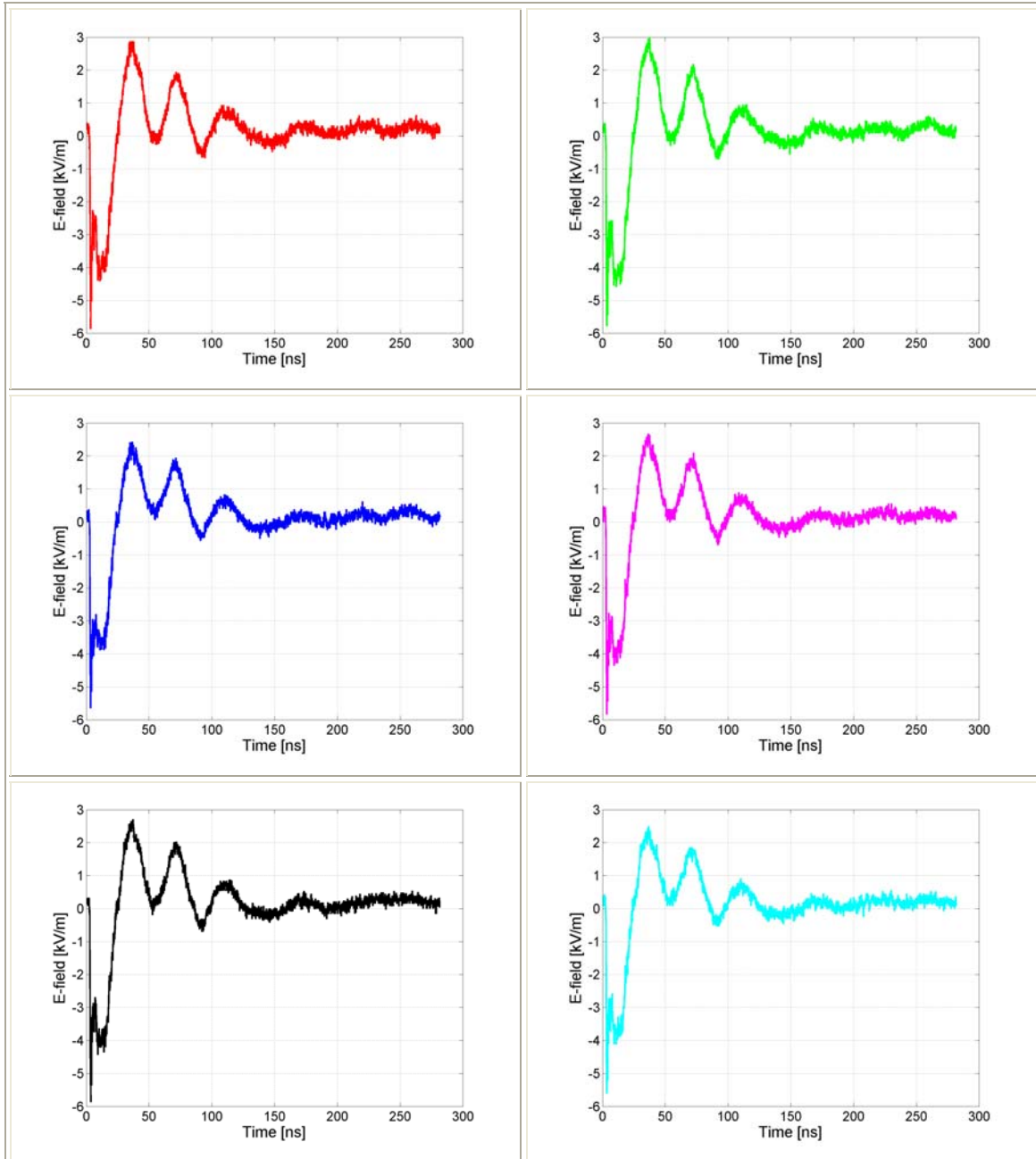
Σχήμα 5.63: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο A3 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση  $-2$  kV.

- Σημείο A4 (65 cm)



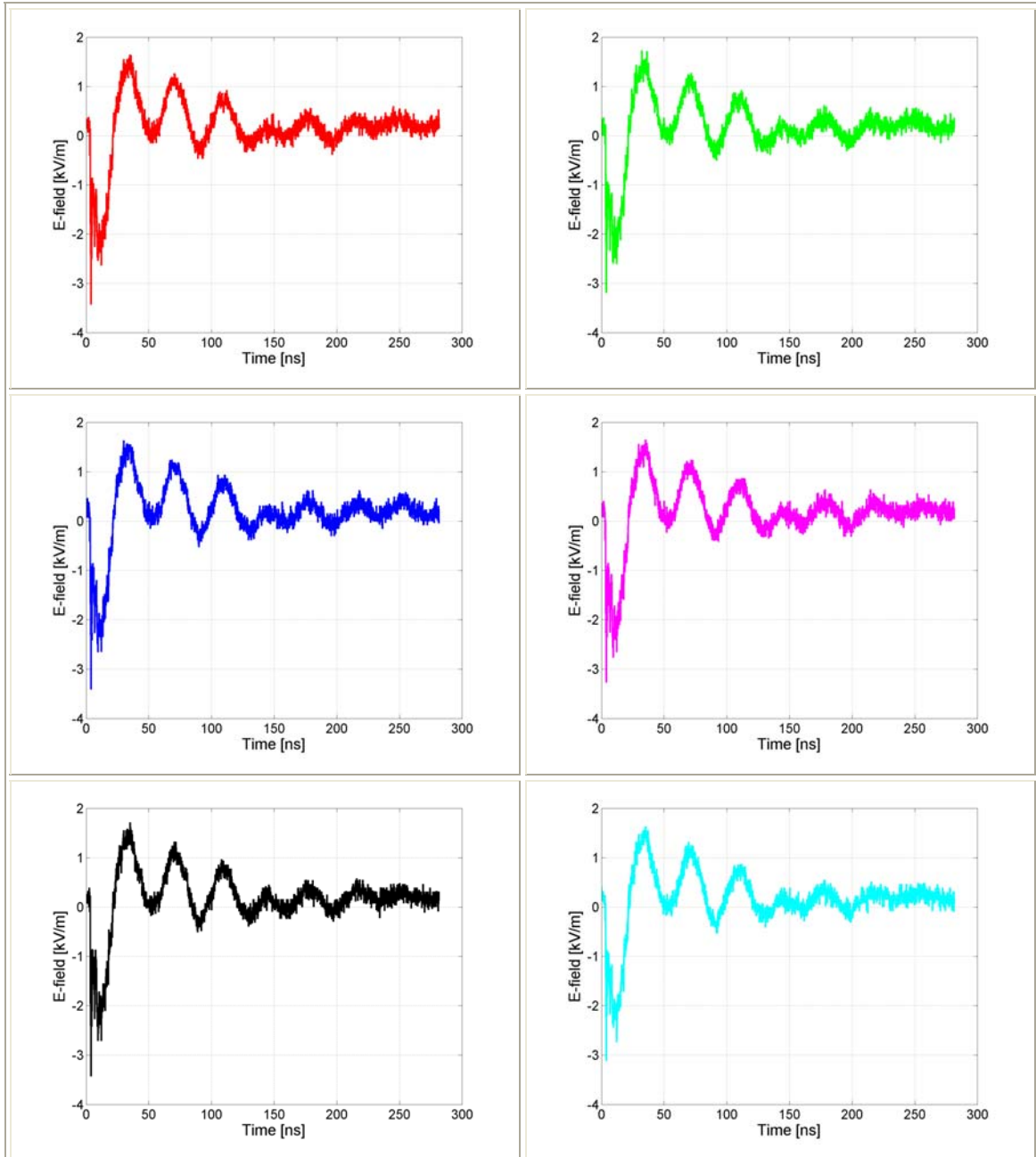
Σχήμα 5.64: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο A4 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση  $-2$  kV.

- Σημείο C1 (20 cm)



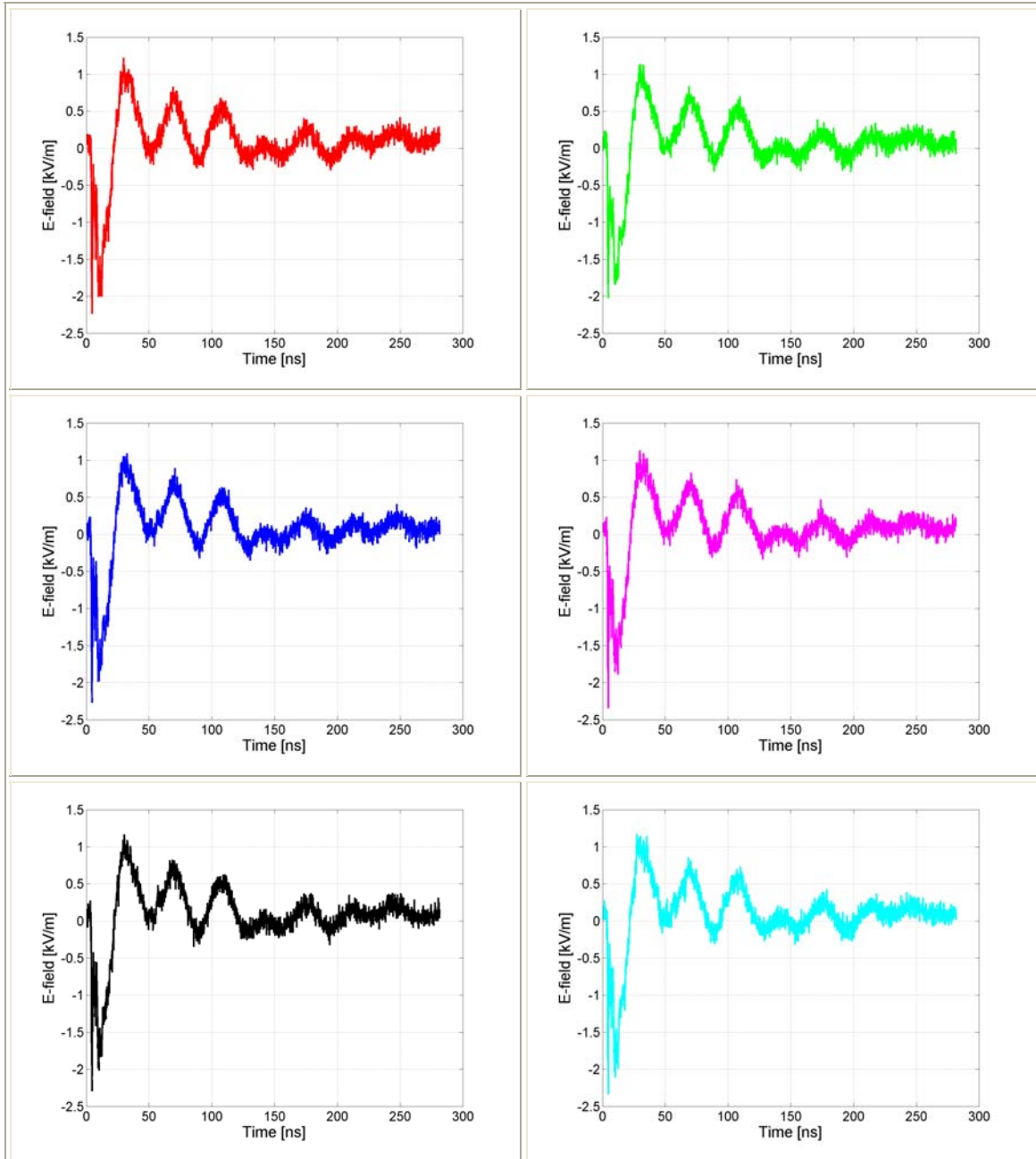
Σχήμα 5.65: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο C1 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση  $-2$  kV.

- Σημείο C2 (35 cm)



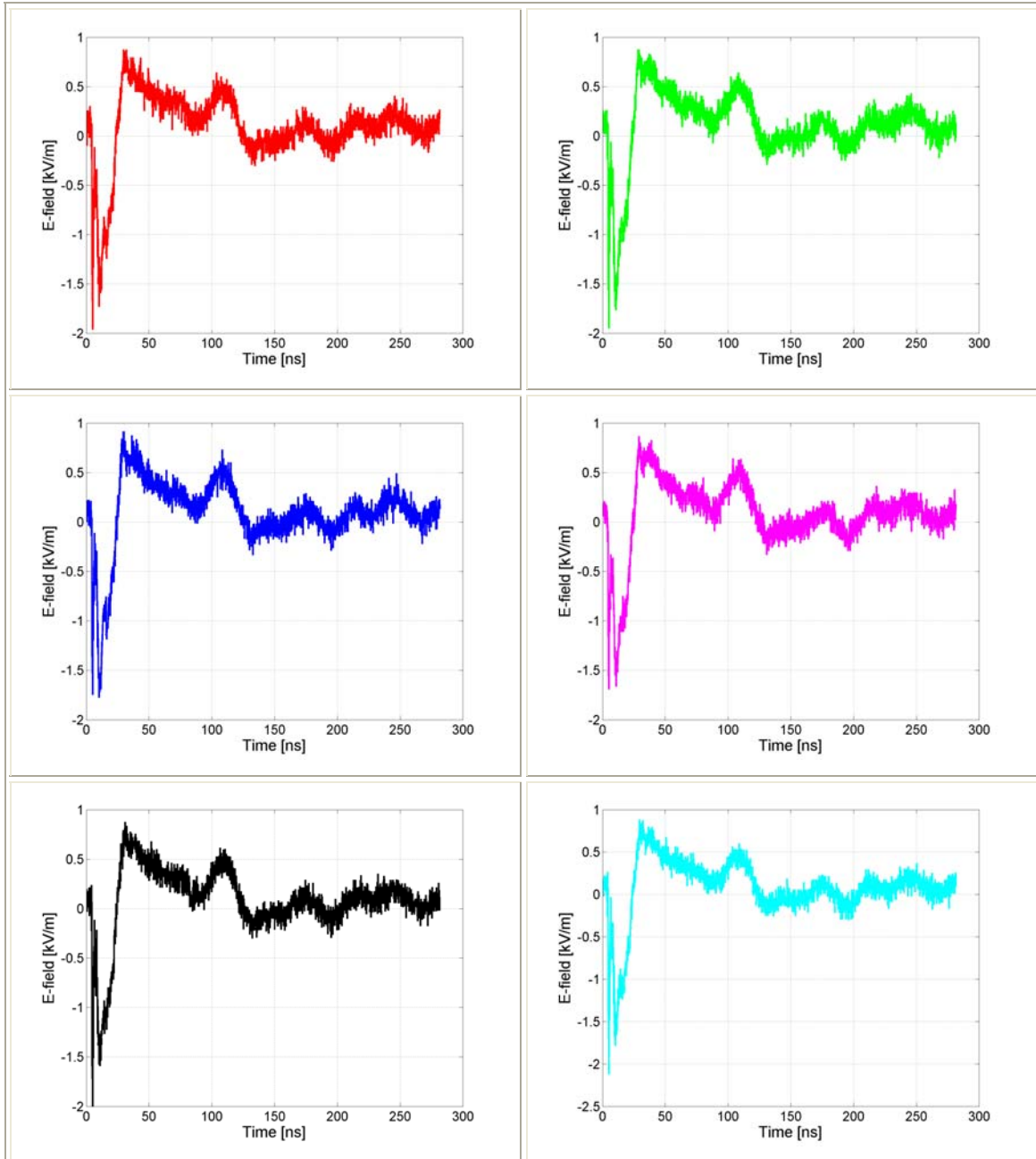
Σχήμα 5.66: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο C2 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση  $-2$  kV.

- Σημείο C3 (50 cm)



Σχήμα 5.67: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο C3 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση  $-2$  kV.

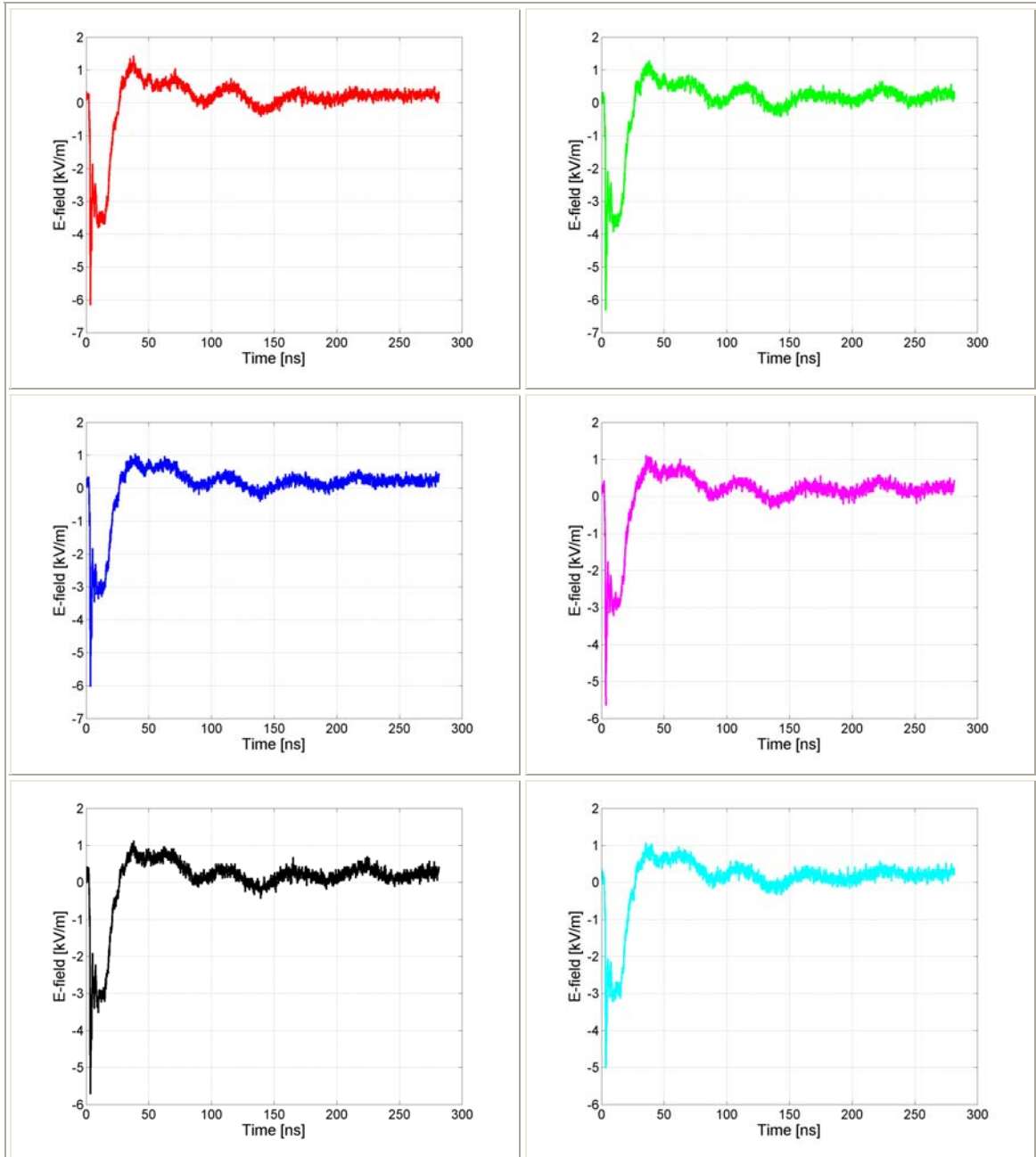
- Σημείο C4 (65 cm)



Σχήμα 5.68: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο C4 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση  $-2$  kV.

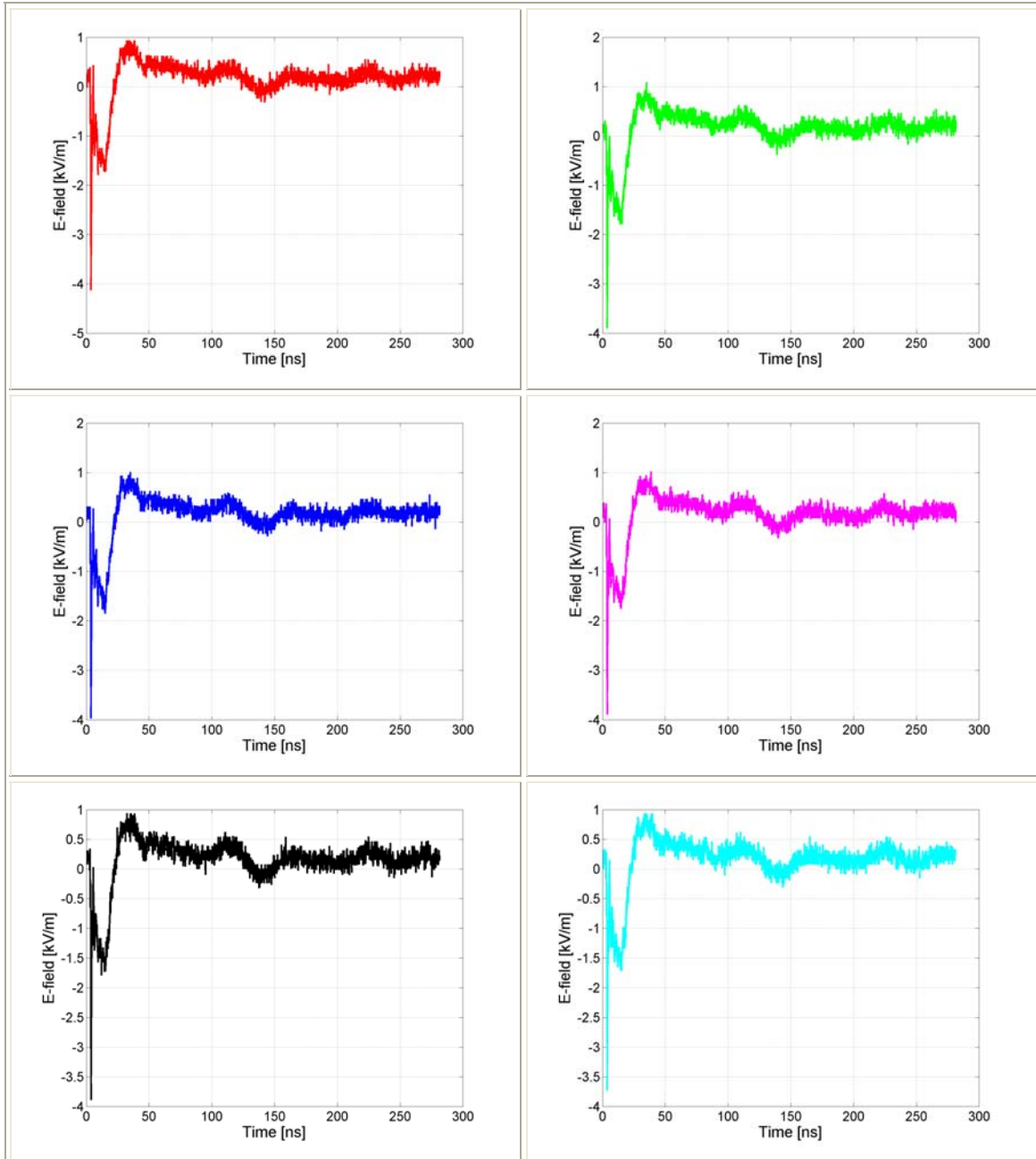


- Σημείο D1 (20 cm)



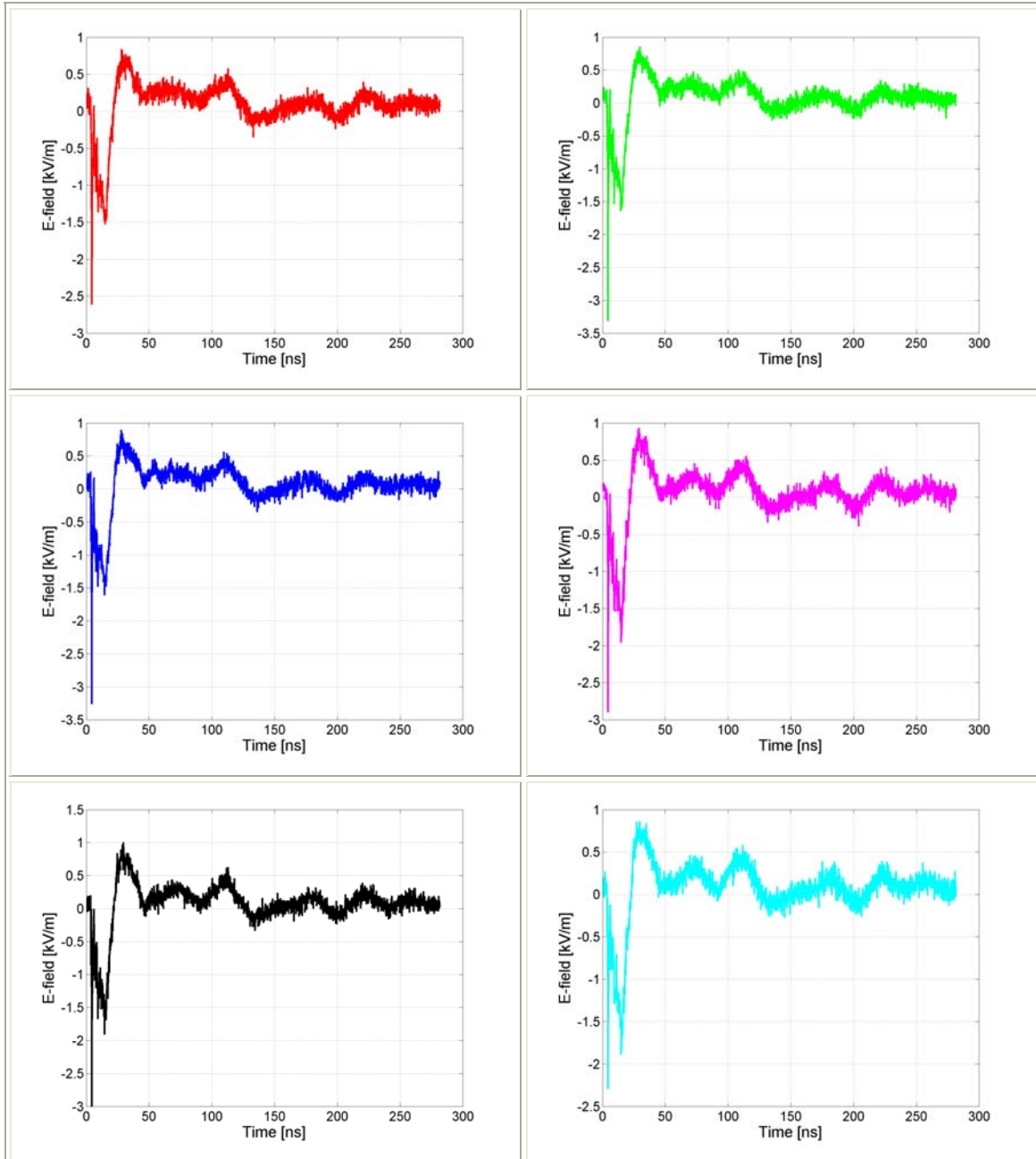
Σχήμα 5.69: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο D1 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση  $-2$  kV.

- Σημείο D2 (35 cm)



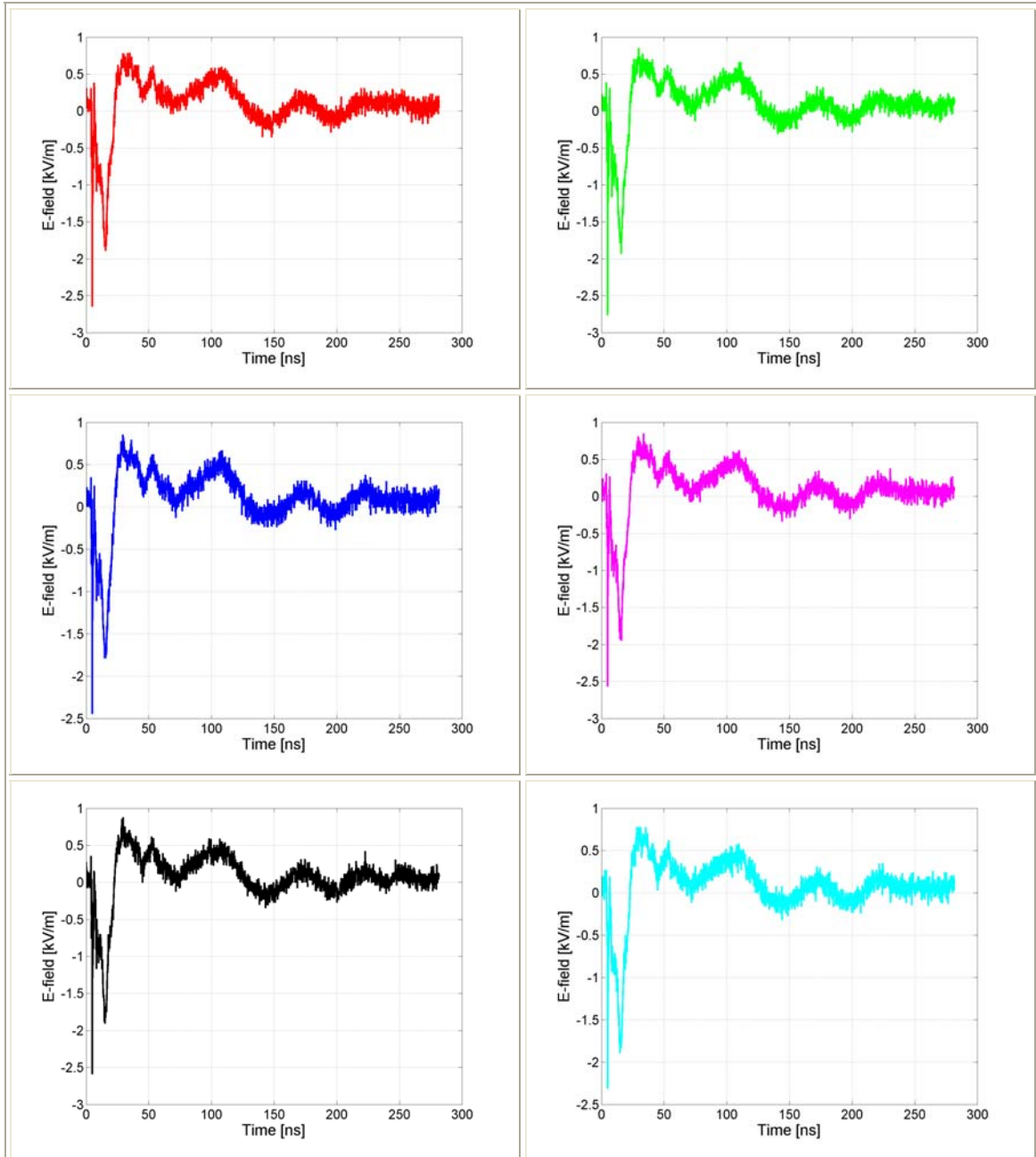
Σχήμα 5.70: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο D2 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση  $-2$  kV.

- Σημείο D3 (50 cm)



Σχήμα 5.71: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο  $D3$  για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση  $-2$  kV.

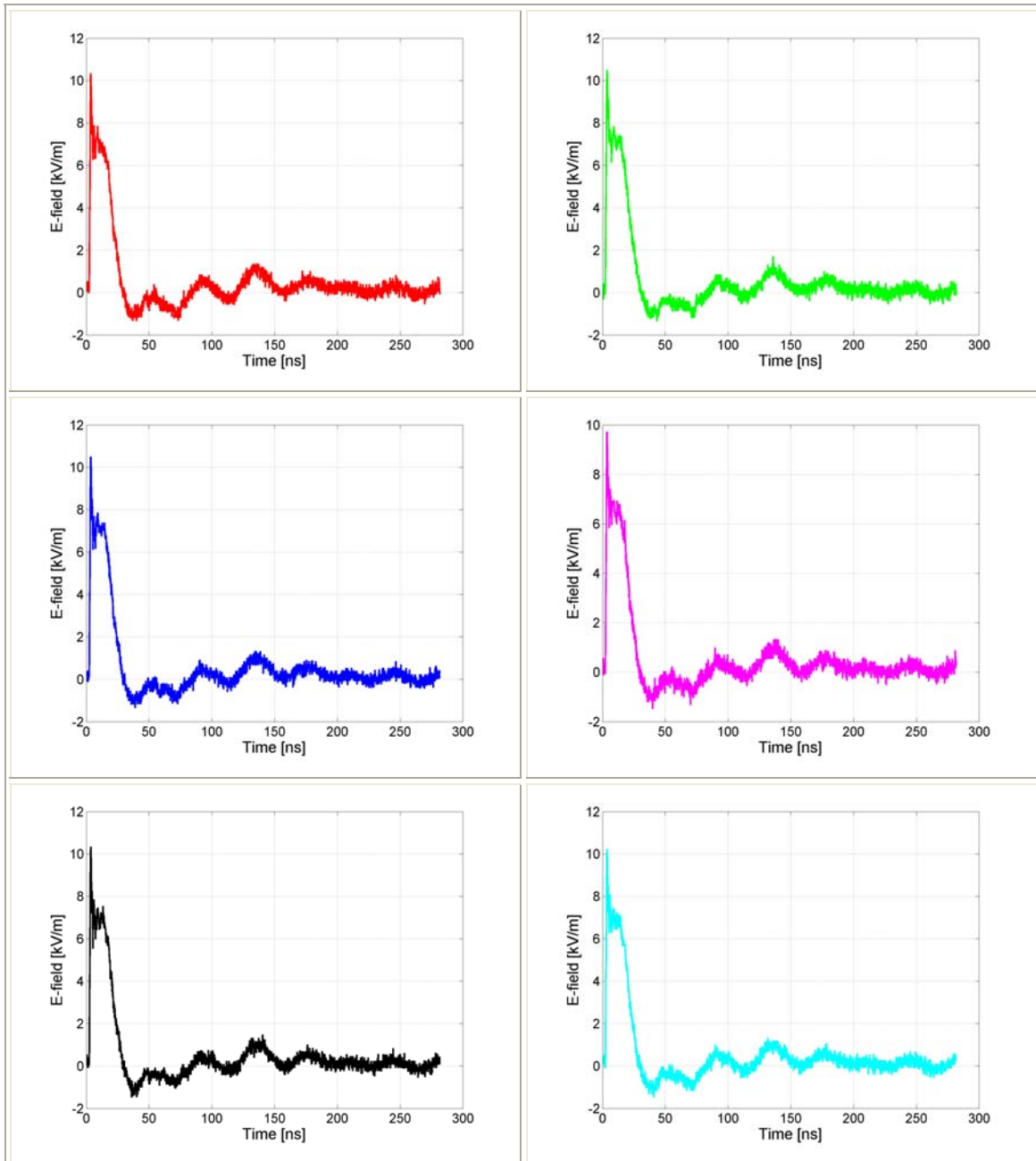
- Σημείο D4 (65 cm)



Σχήμα 5.72: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο D4 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση  $-2$  kV.

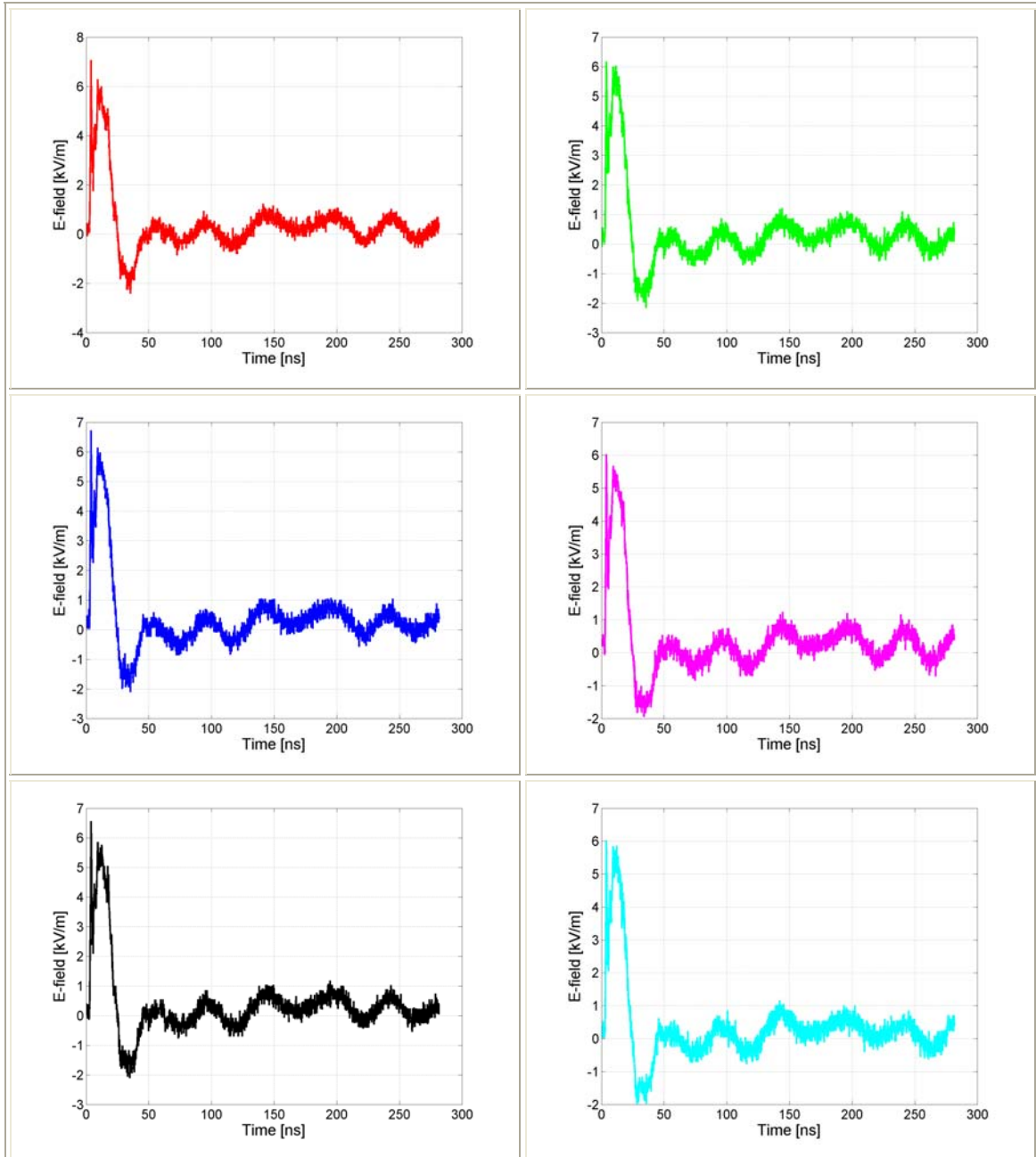
### 5.2.7 Εκφορτίσεις επαφής υπό τάση 4 kV με τη γεννήτρια NSG-438

- Σημείο A1 (20 cm)



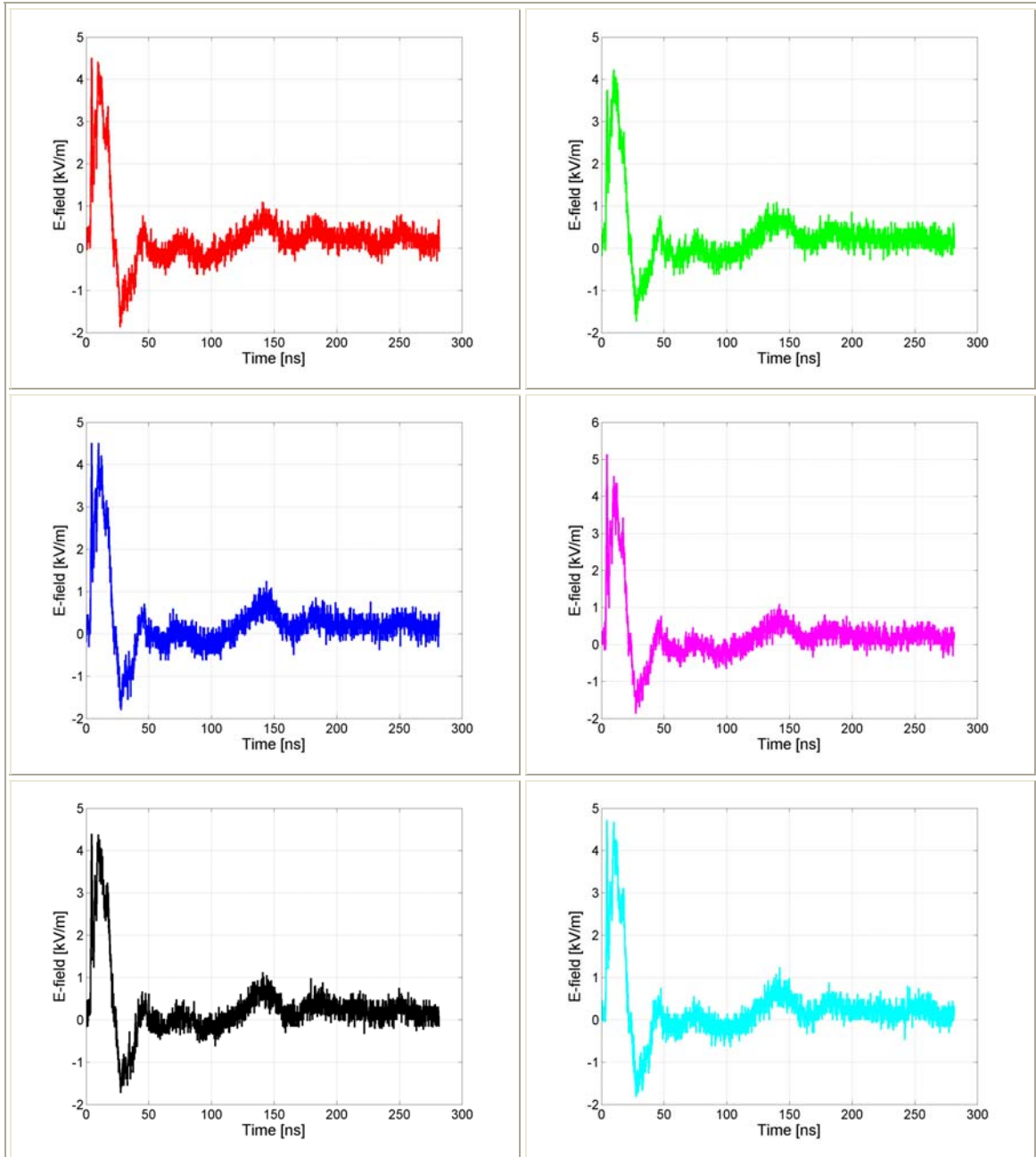
Σχήμα 5.73: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο A1 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση 4 kV.

- Σημείο A2 (35 cm)



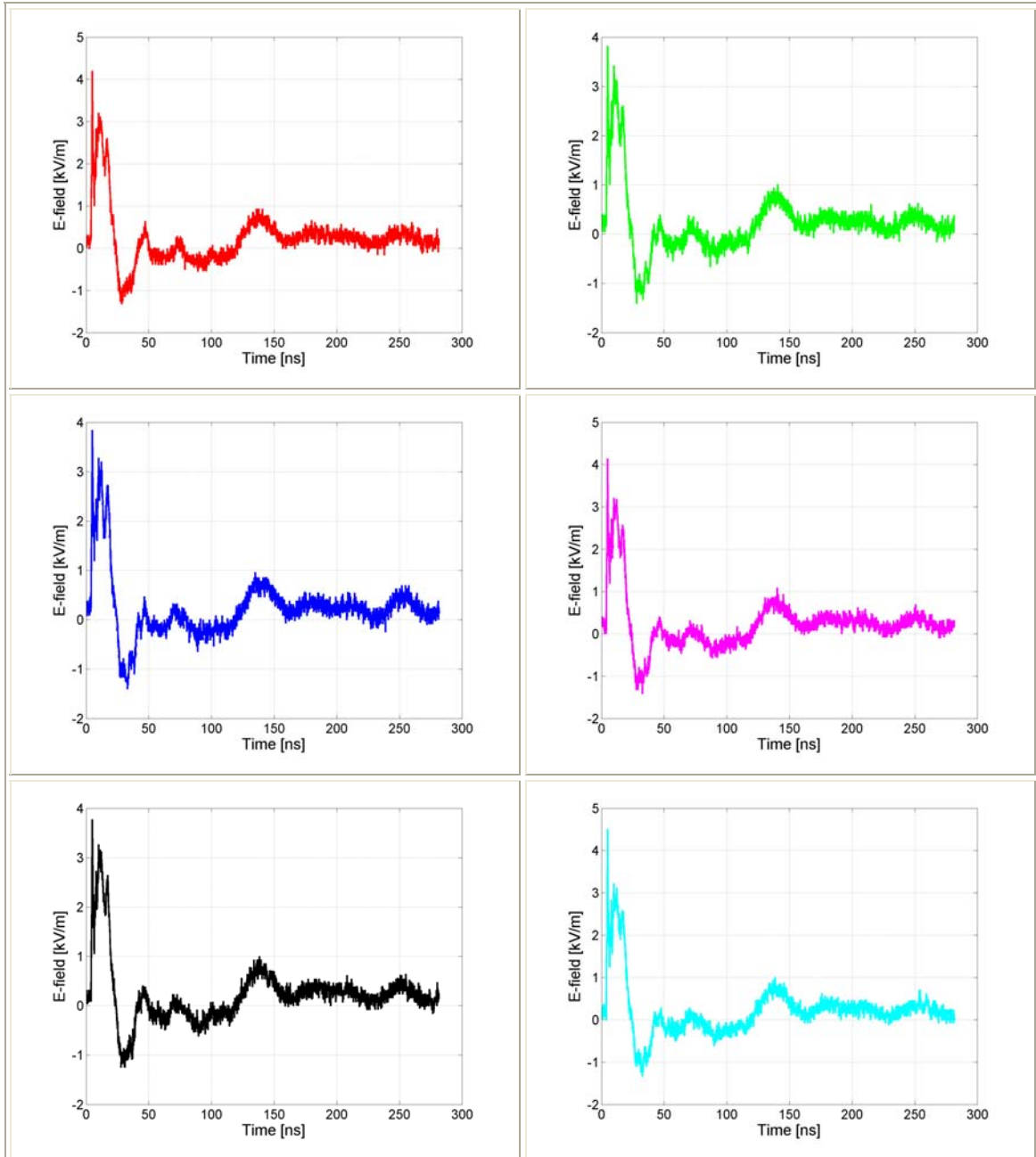
Σχήμα 5.74: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο A2 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση 4 kV.

- Σημείο A3 (50 cm)



Σχήμα 5.75: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο A3 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση 4 kV.

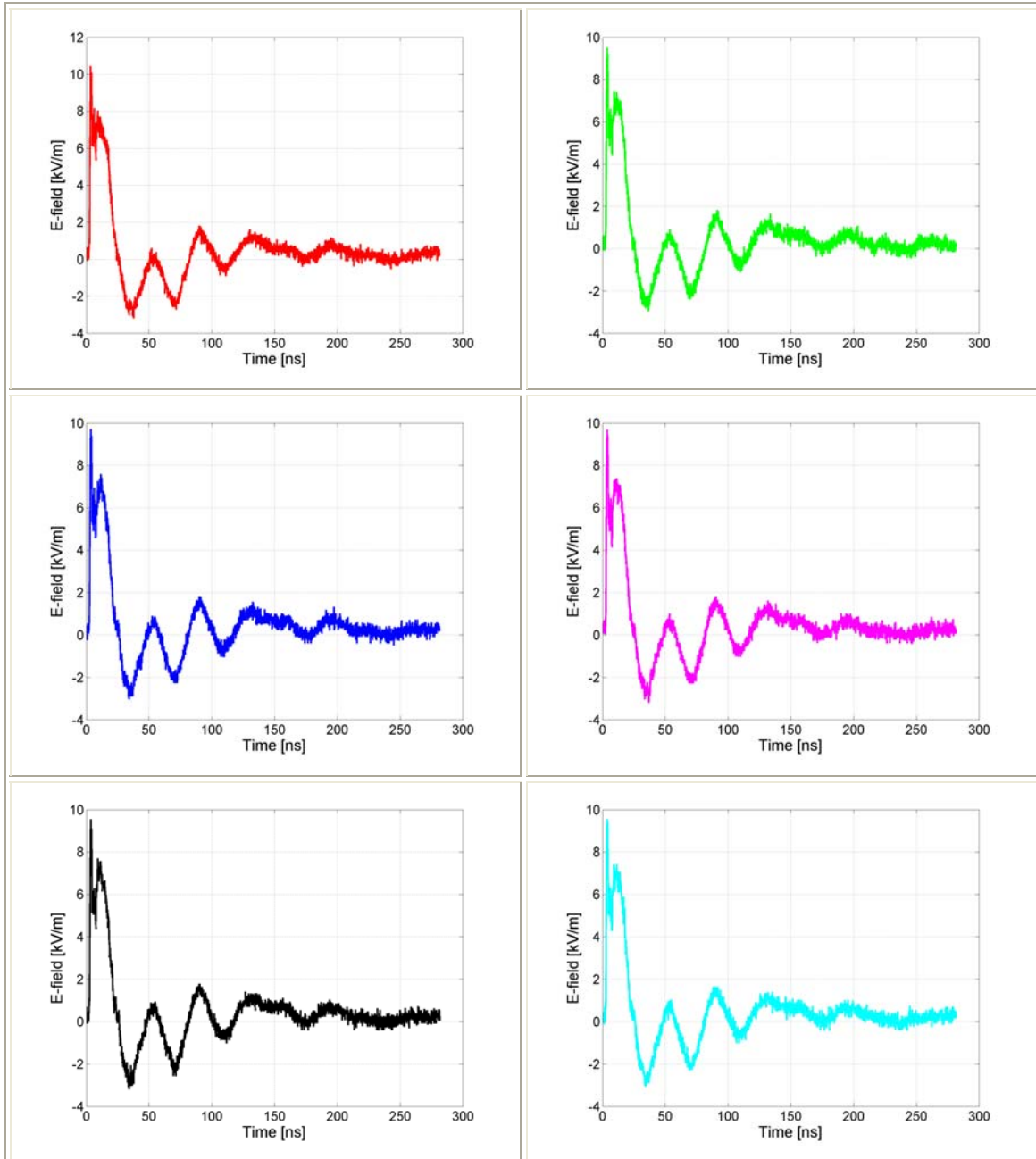
- Σημείο A4 (65 cm)



Σχήμα 5.76: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο A4 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση 4 kV.

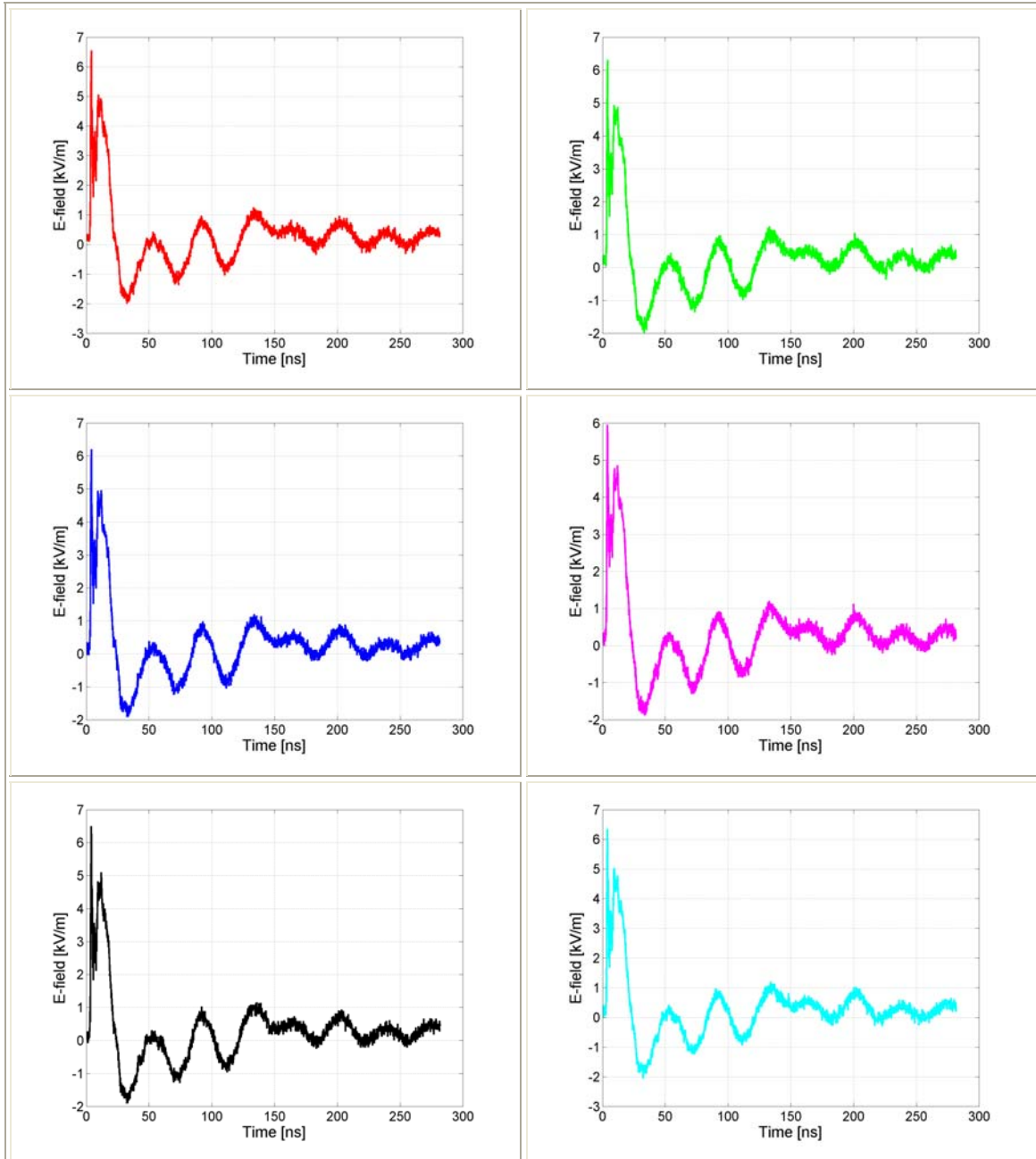


- Σημείο C1 (20 cm)



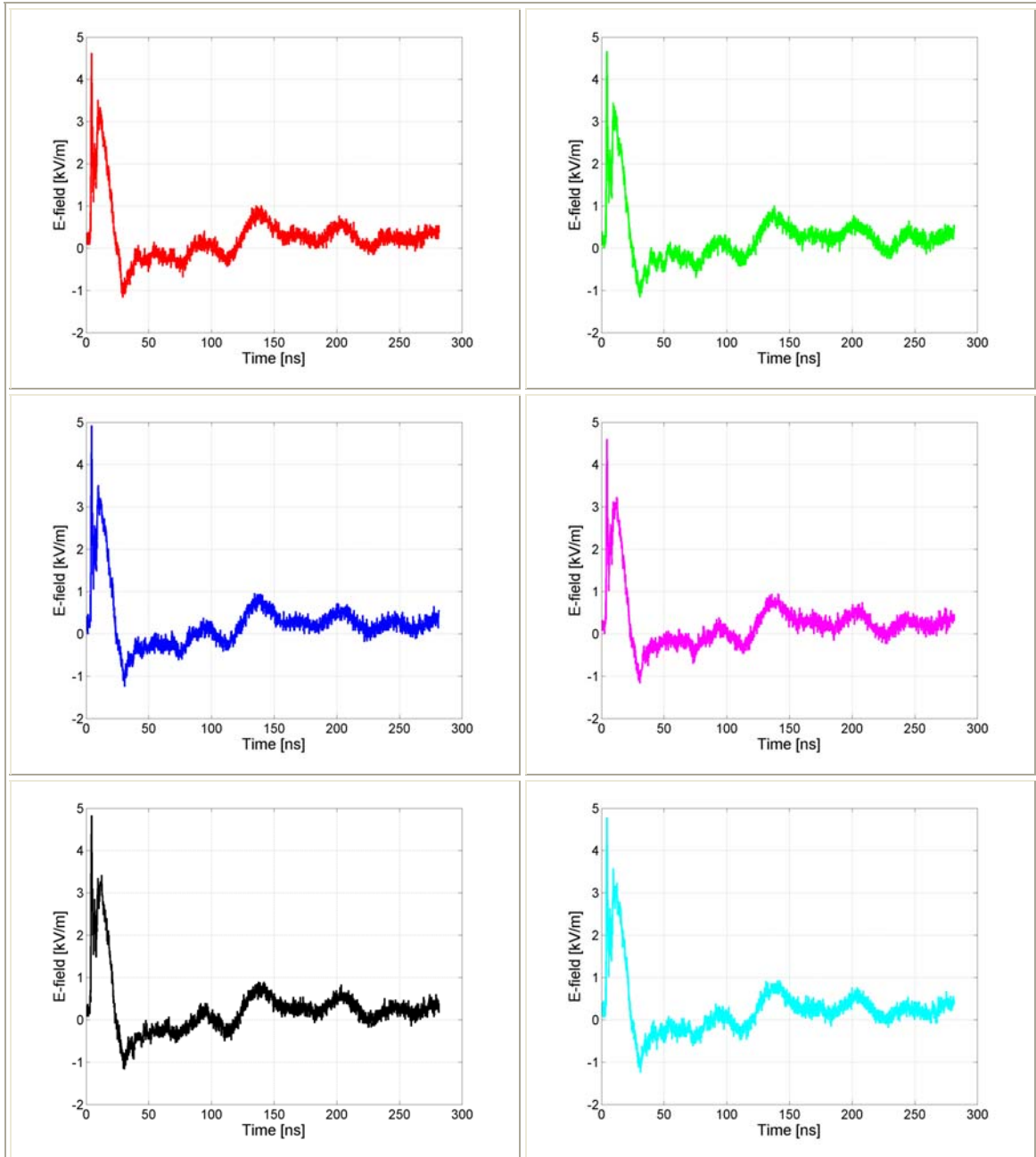
Σχήμα 5.77: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο C1 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση 4 kV.

- Σημείο C2 (35 cm)



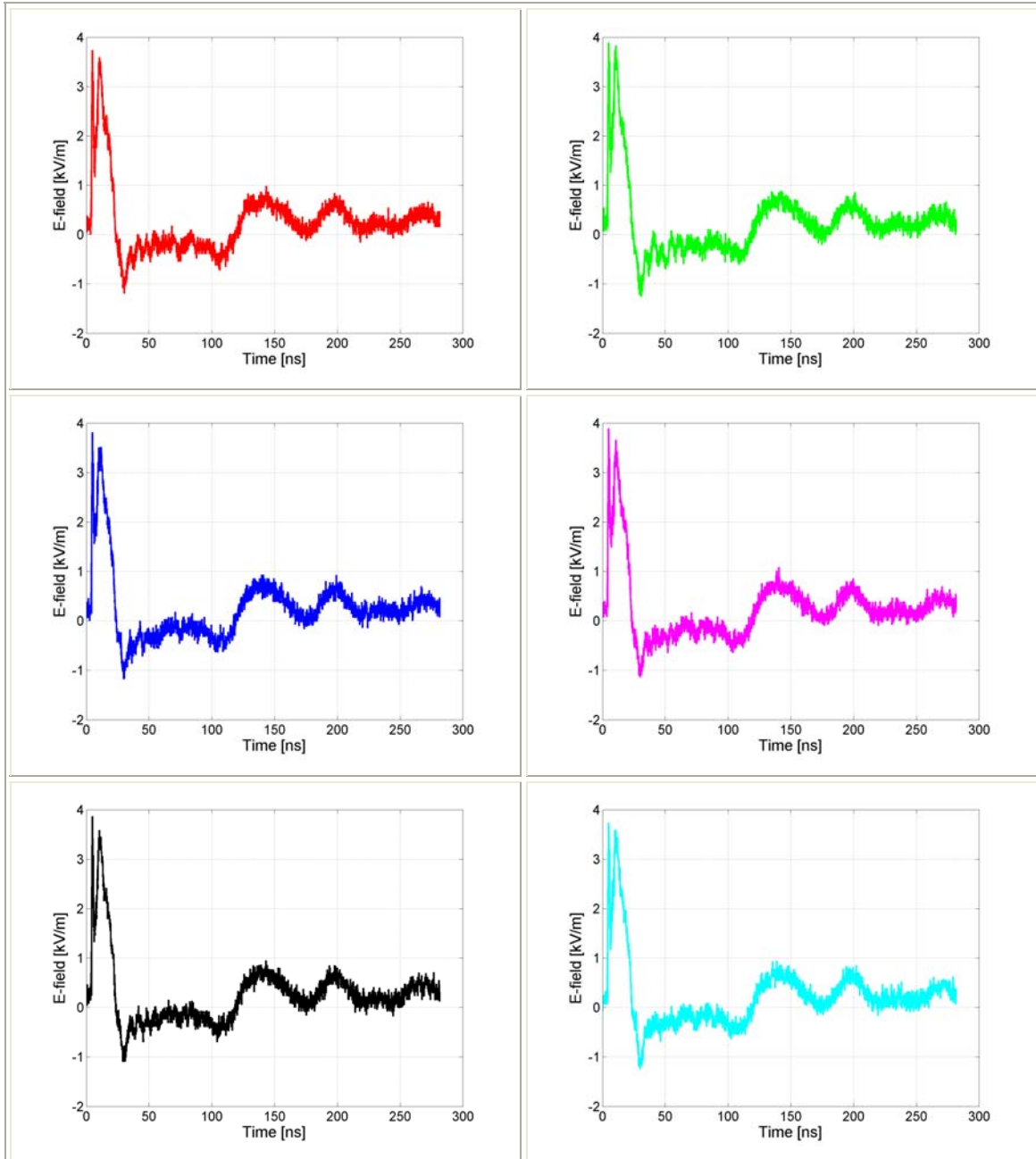
Σχήμα 5.78: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο C2 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση 4 kV.

- Σημείο C3 (50 cm)



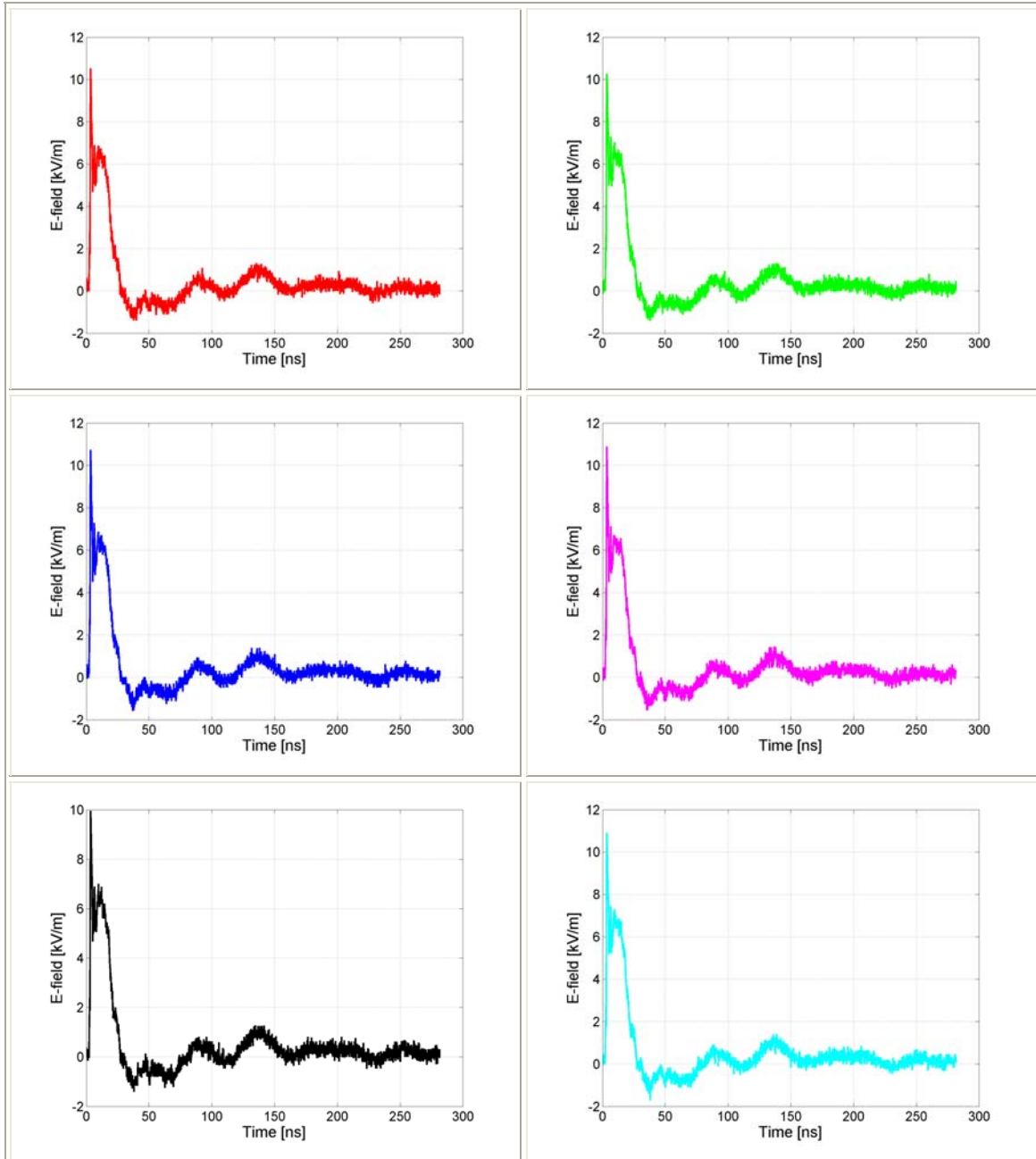
Σχήμα 5.79: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο C3 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση 4 kV.

- Σημείο C4 (65 cm)



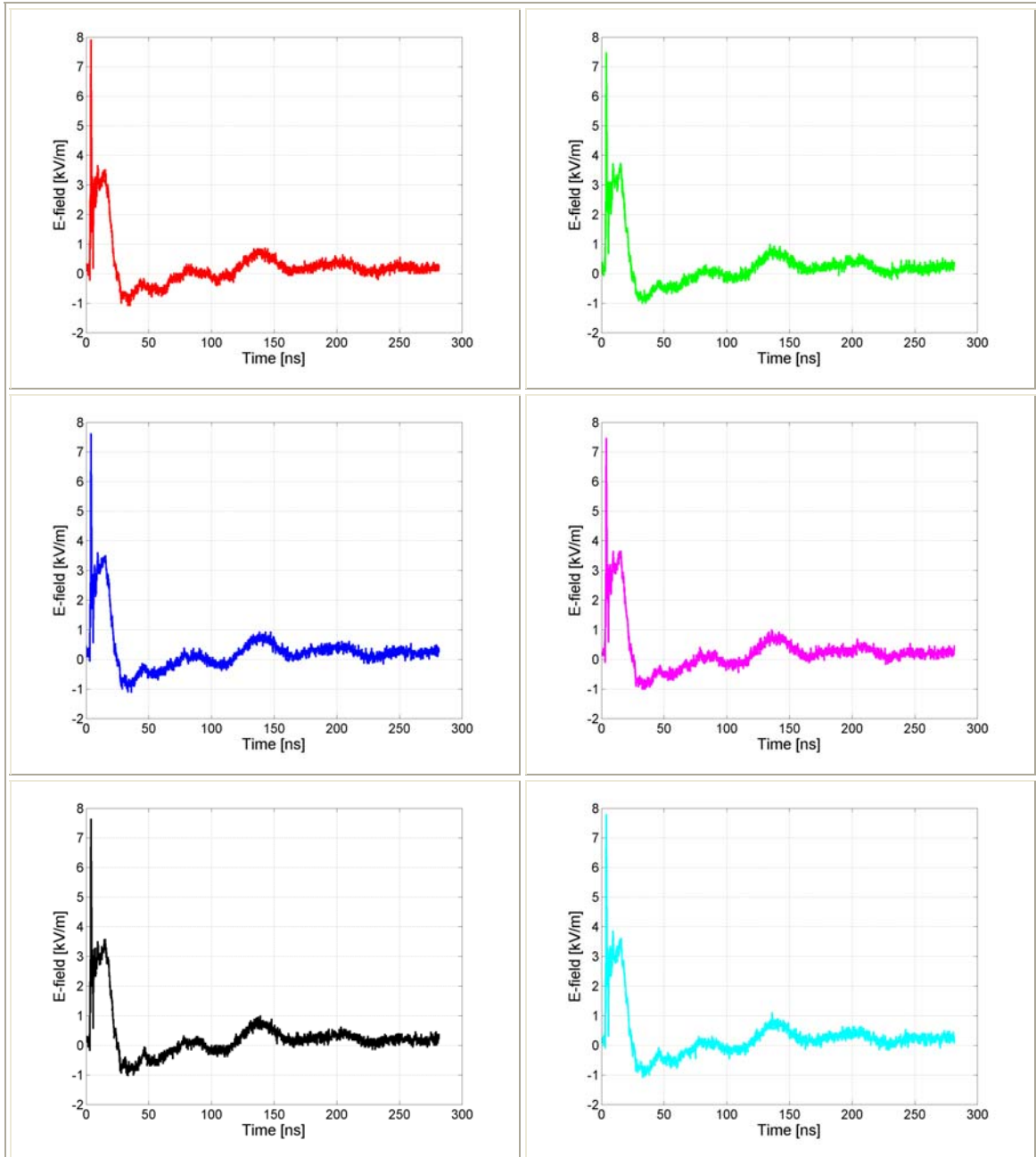
Σχήμα 5.80: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο C4 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση 4 kV.

- Σημείο D1 (20 cm)



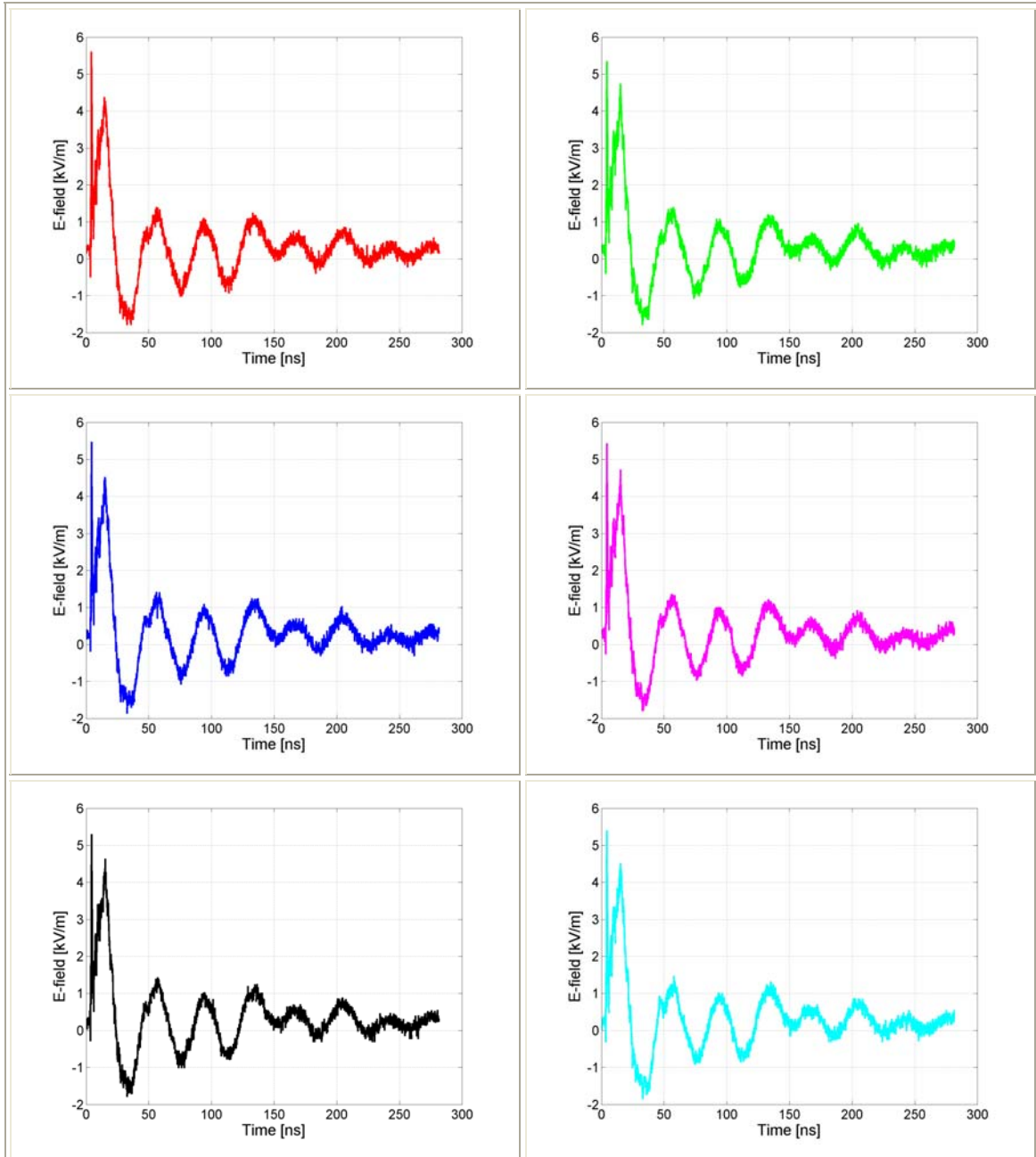
Σχήμα 5.81: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο D1 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση 4 kV.

- Σημείο D2 (35 cm)



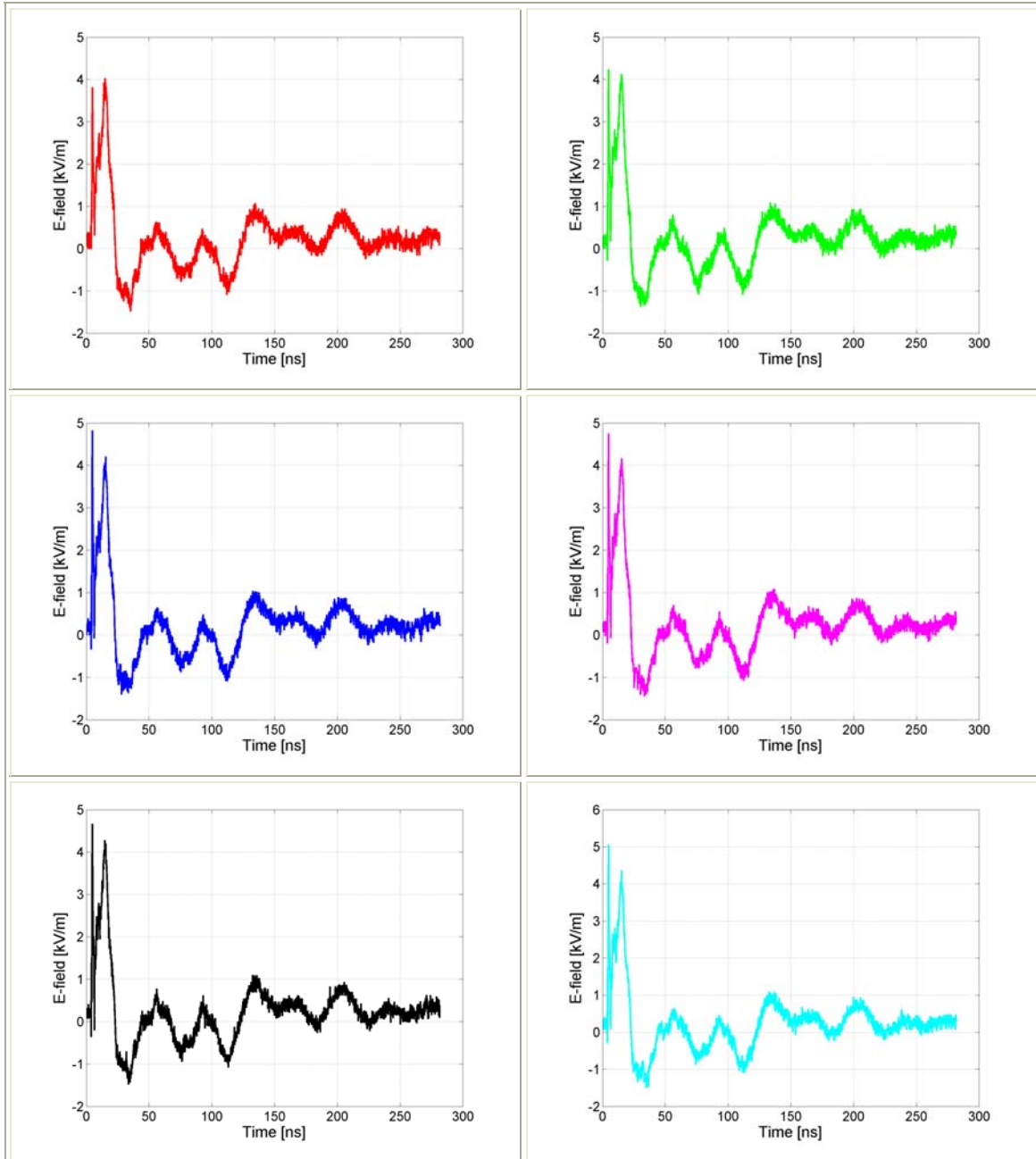
Σχήμα 5.82: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο D2 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση 4 kV.

- Σημείο D3 (50 cm)



Σχήμα 5.83: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο D3 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση 4 kV.

- Σημείο D4 (65 cm)

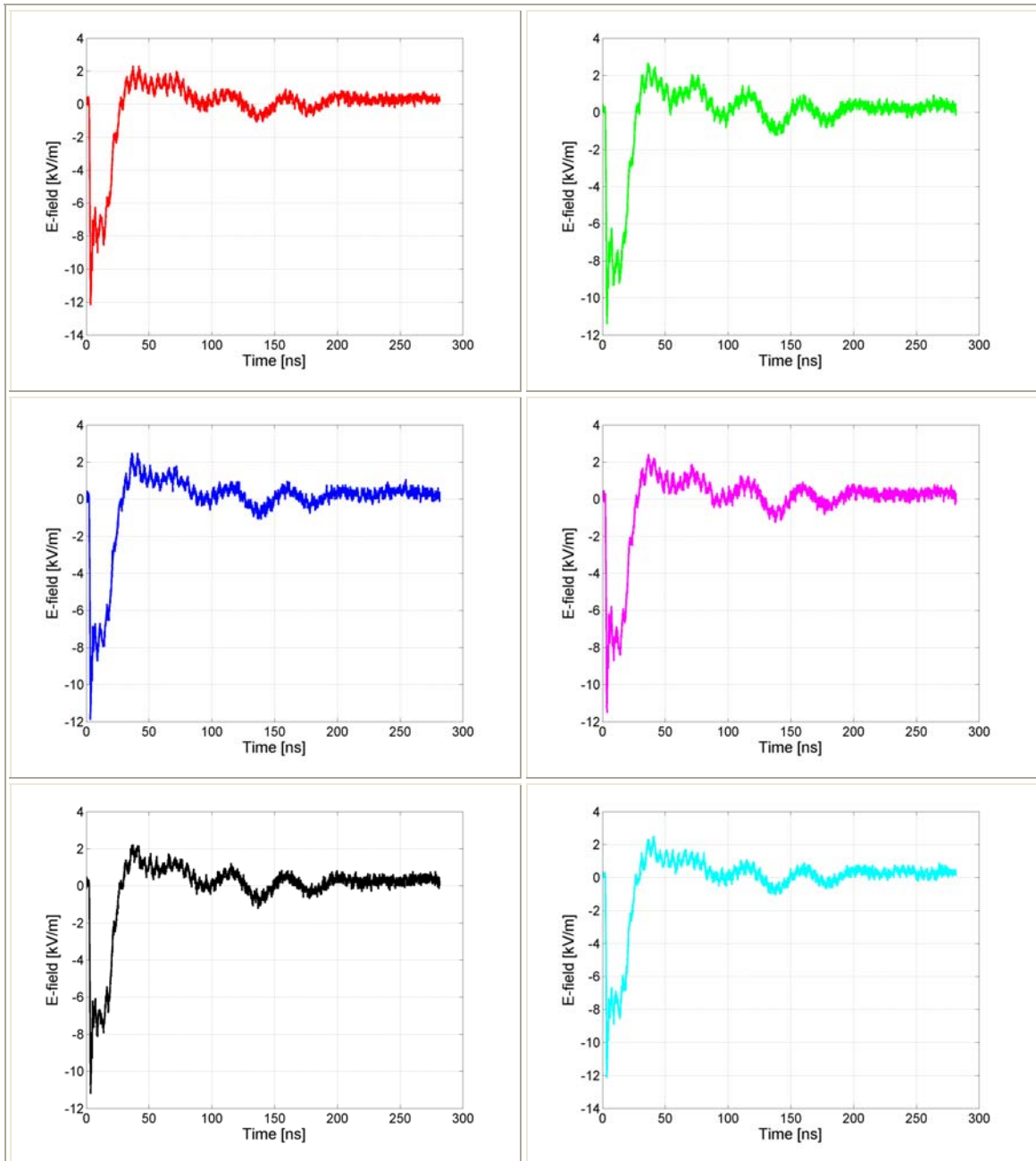


Σχήμα 5.84: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο D4 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση 4 kV.



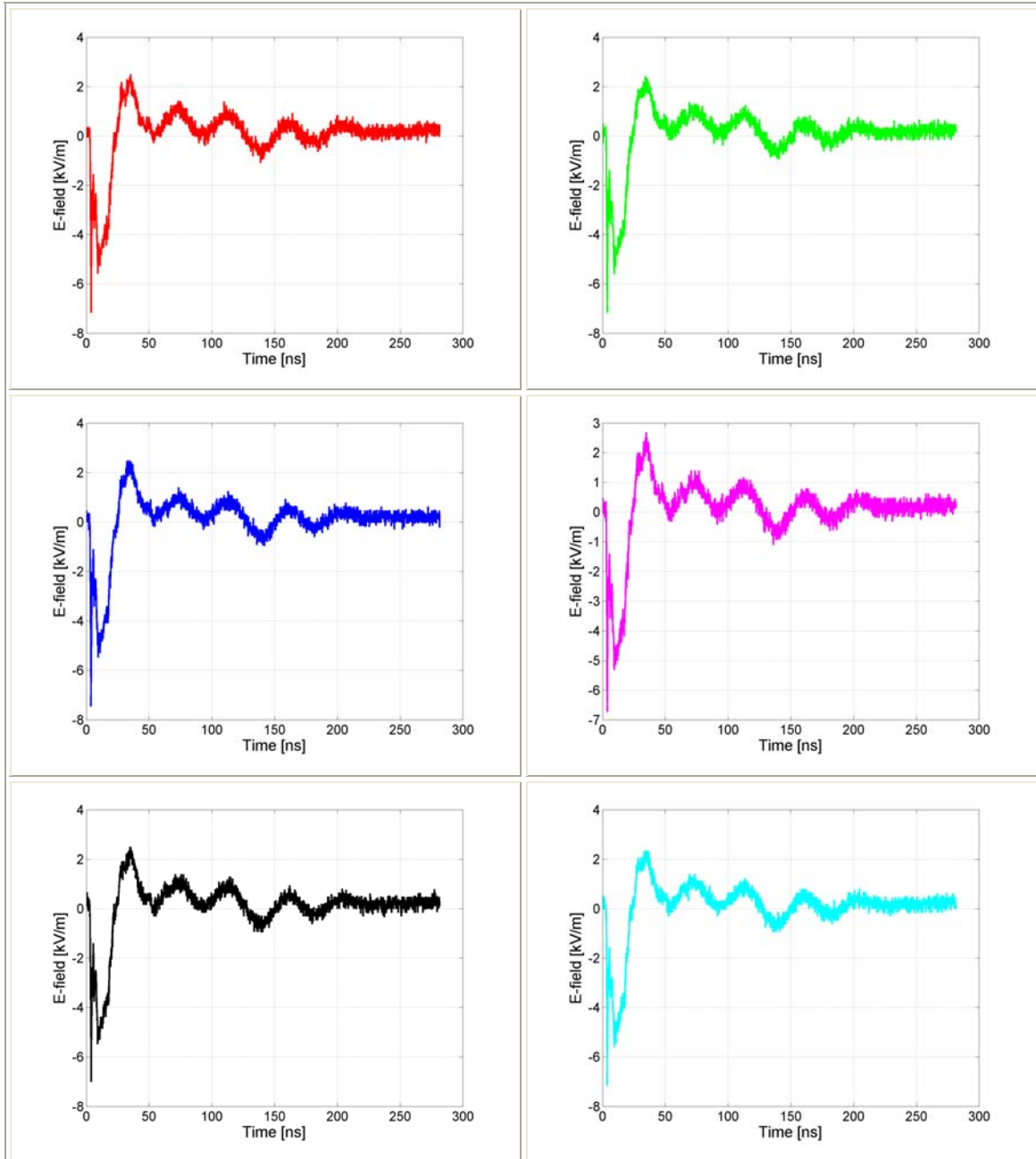
### 5.2.8 Εκφορτίσεις επαφής υπό τάση -4 kV με τη γεννήτρια NSG-438

- Σημείο A1 (20 cm)



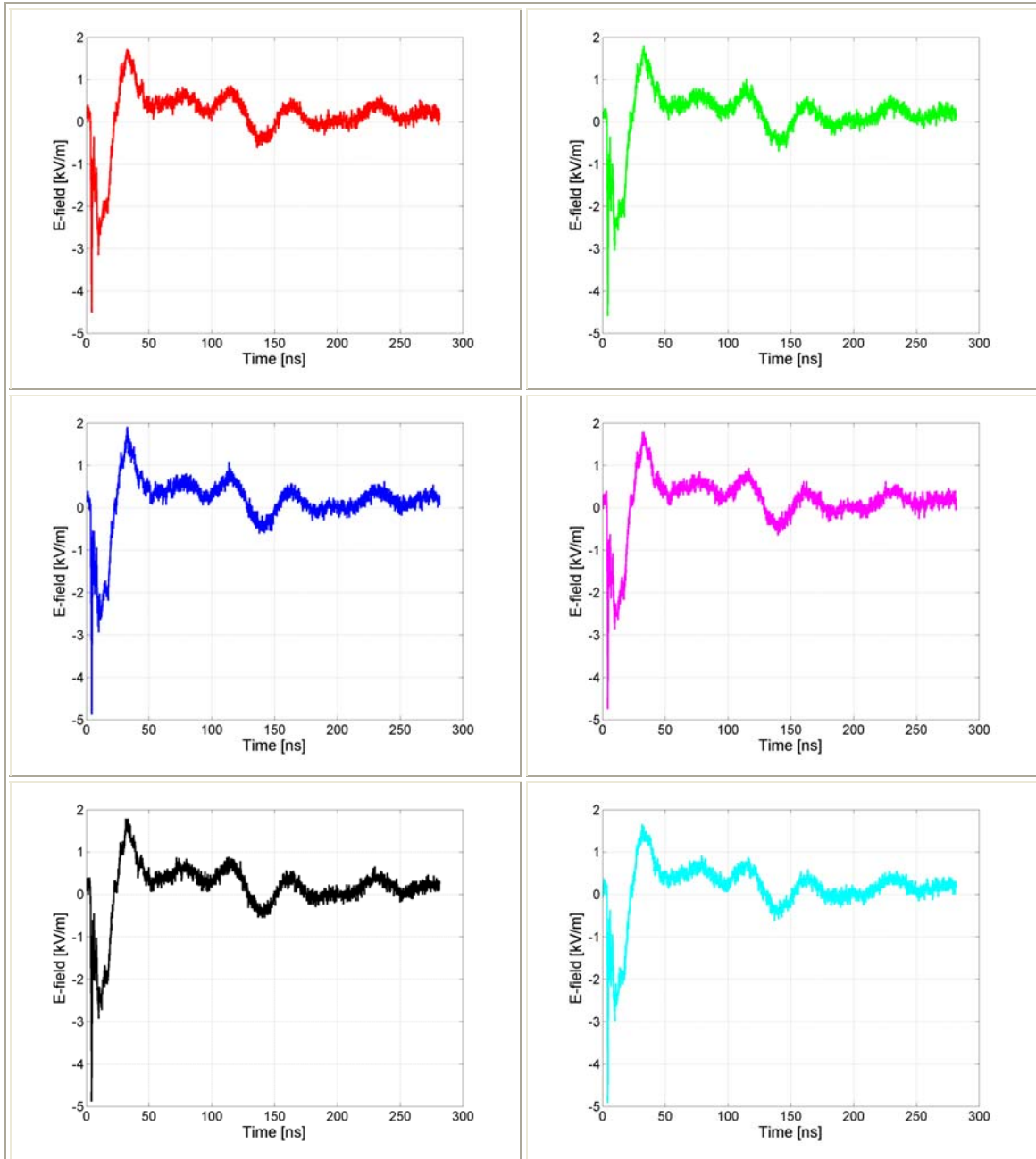
Σχήμα 5.85: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο A1 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση -4 kV.

- Σημείο A2 (35 cm)



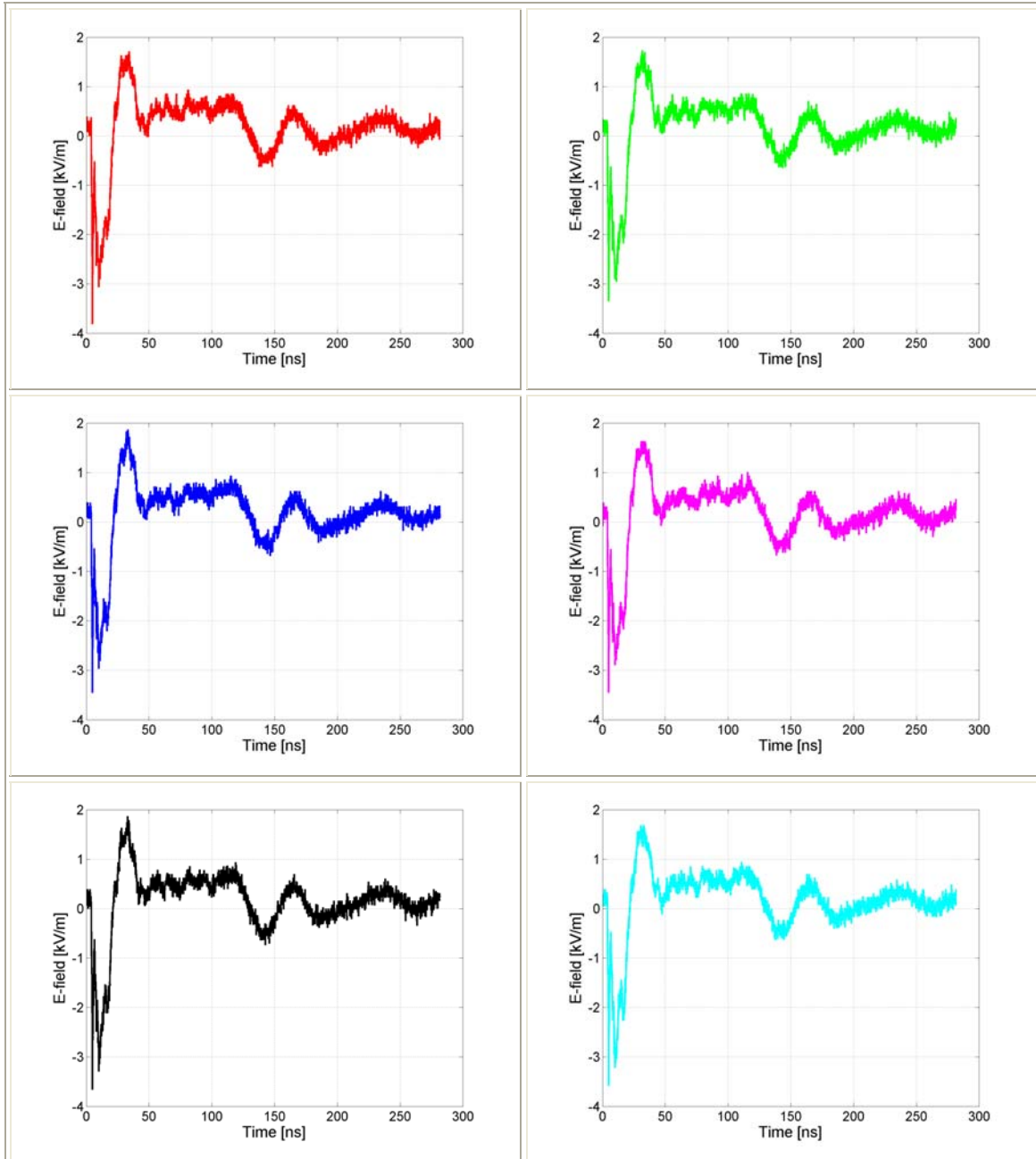
Σχήμα 5.86: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο A2 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση  $-4$  kV.

- Σημείο A3 (50 cm)



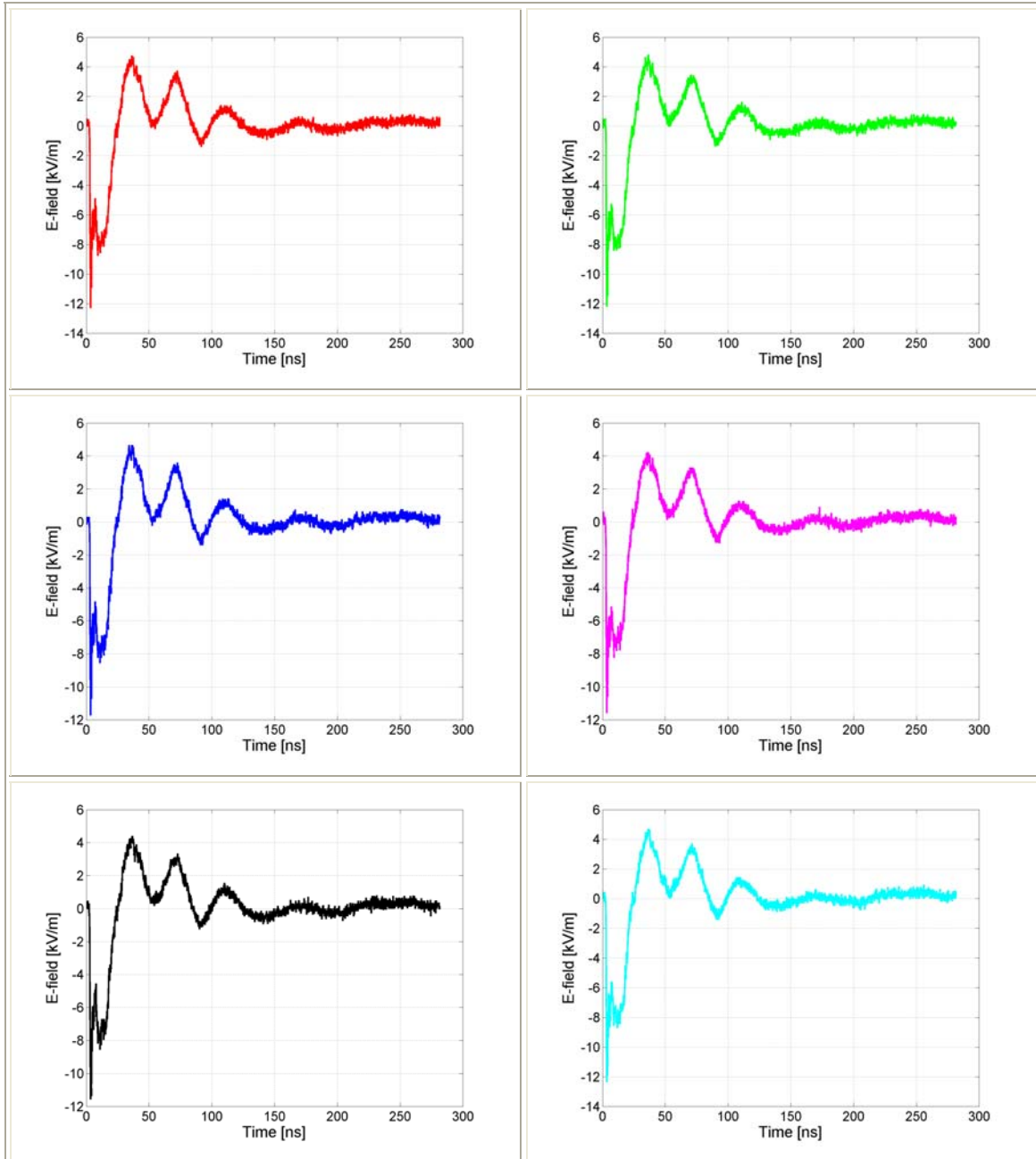
Σχήμα 5.87: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο A3 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση  $-4$  kV.

- Σημείο A4 (65 cm)



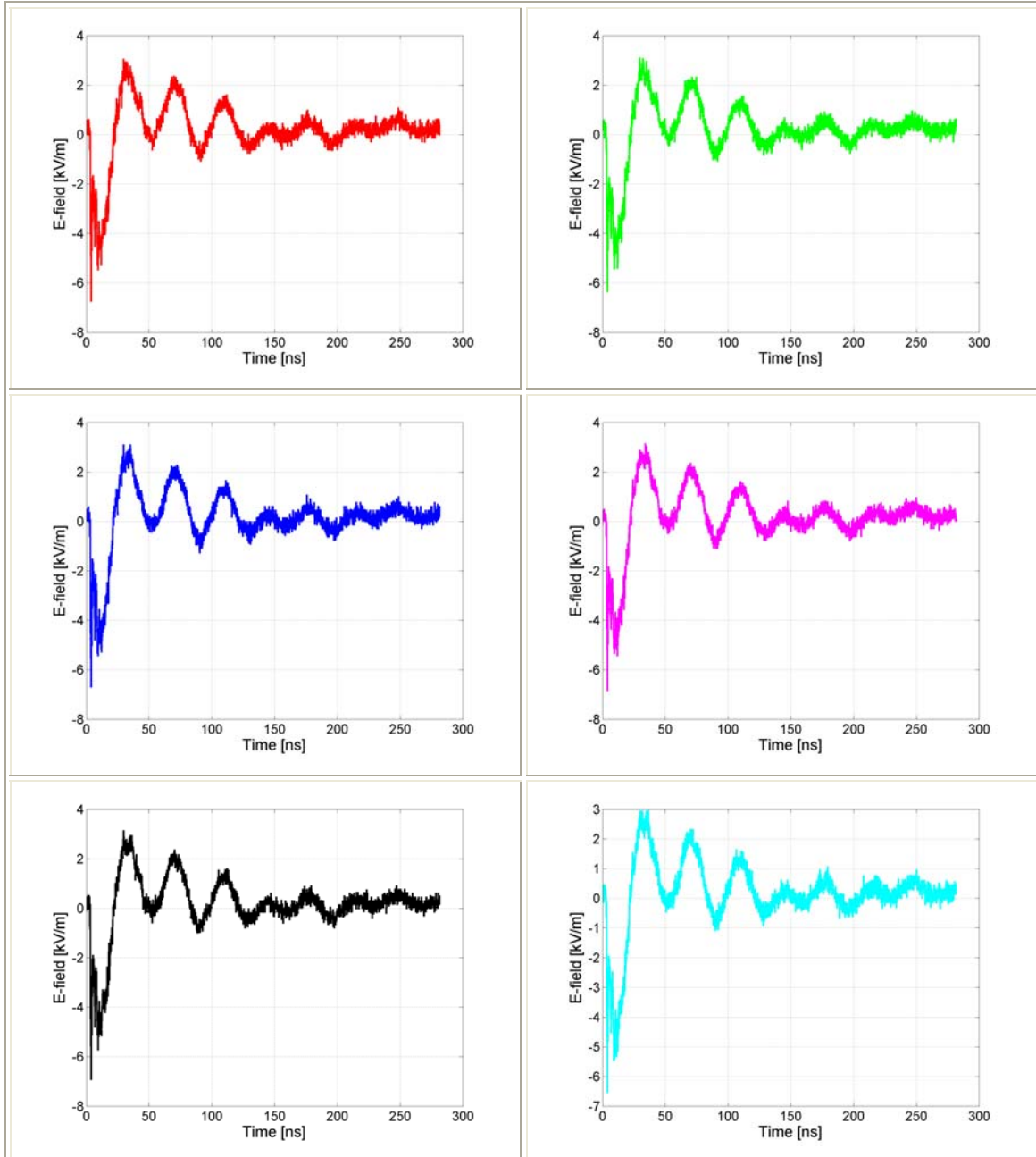
Σχήμα 5.88: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο A4 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση  $-4$  kV.

- Σημείο C1 (20 cm)



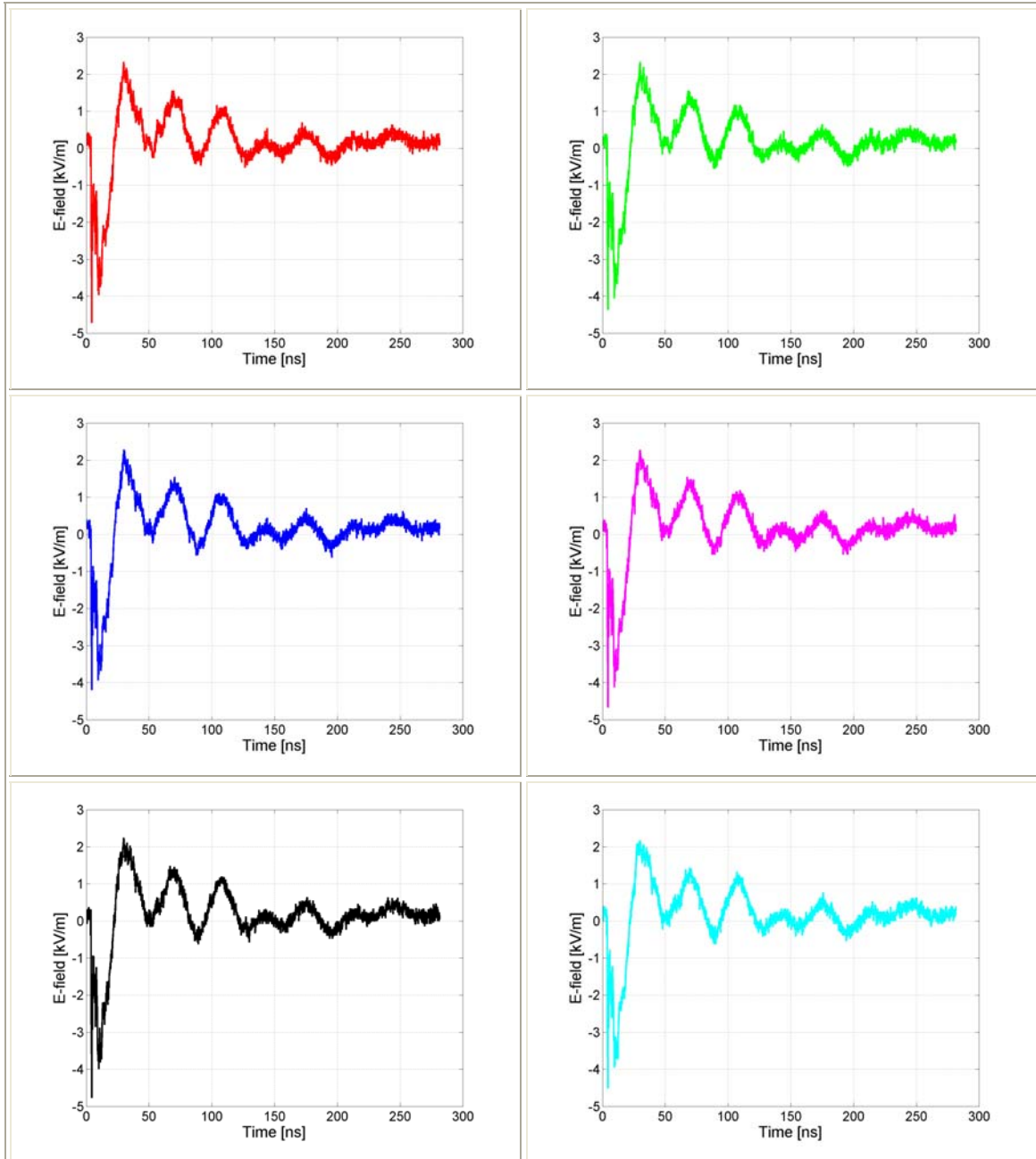
Σχήμα 5.89: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο C1 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση  $-4$  kV.

- Σημείο C2 (35 cm)



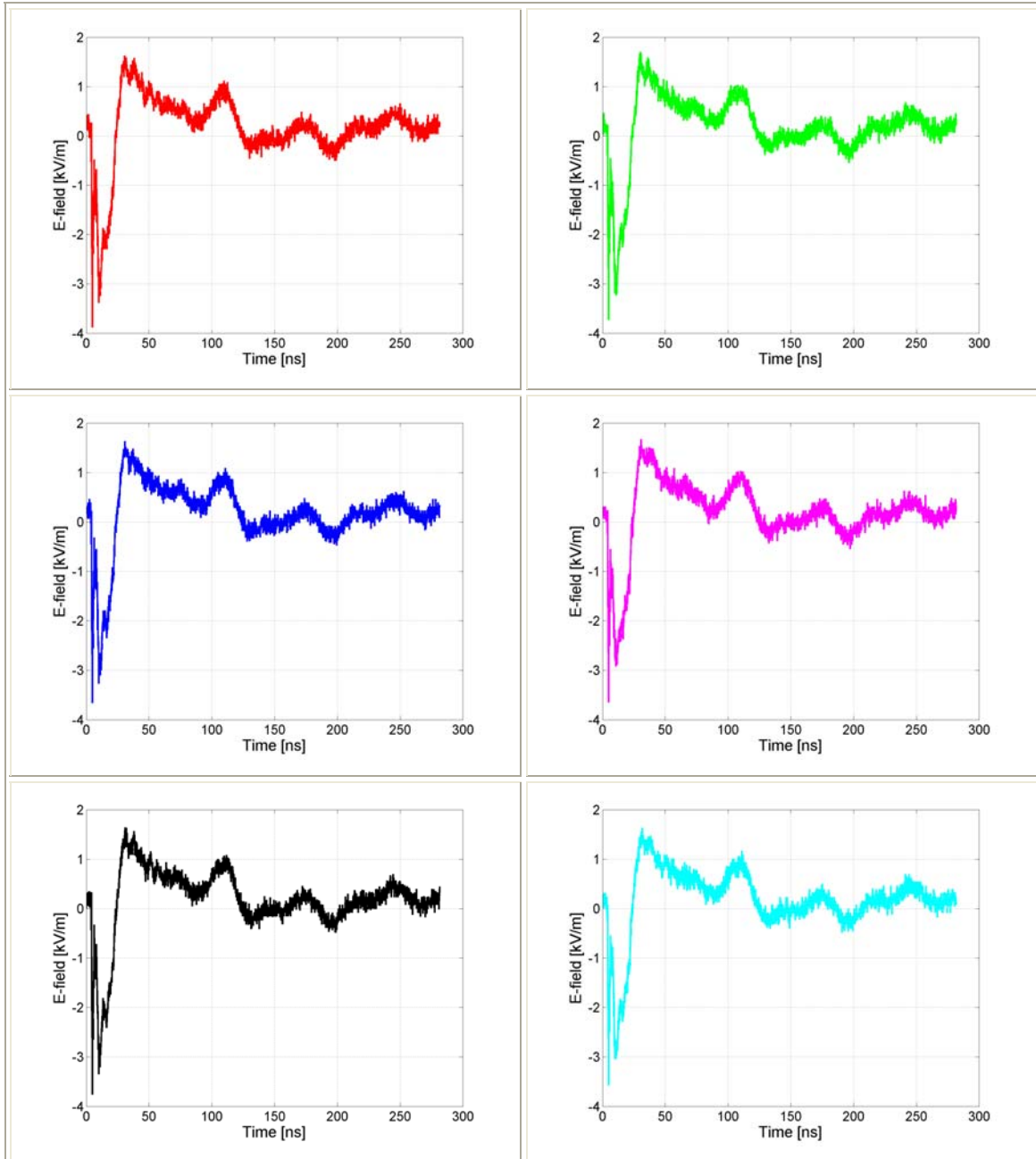
Σχήμα 5.90: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο C2 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση  $-4$  kV.

- Σημείο C3 (50 cm)



Σχήμα 5.91: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο C3 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση  $-4$  kV.

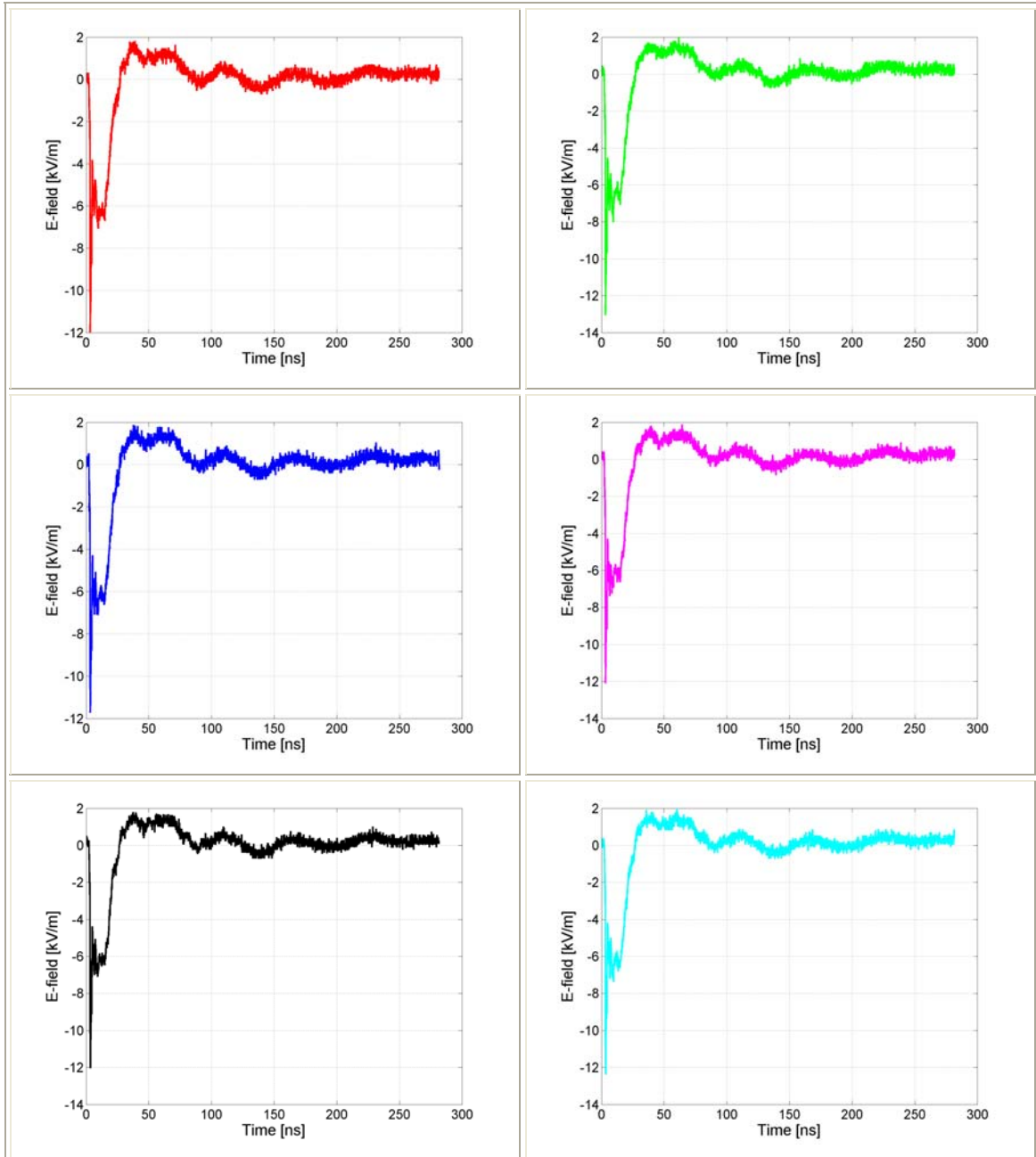
- Σημείο C4 (65 cm)



Σχήμα 5.92: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο C4 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση -4 kV.

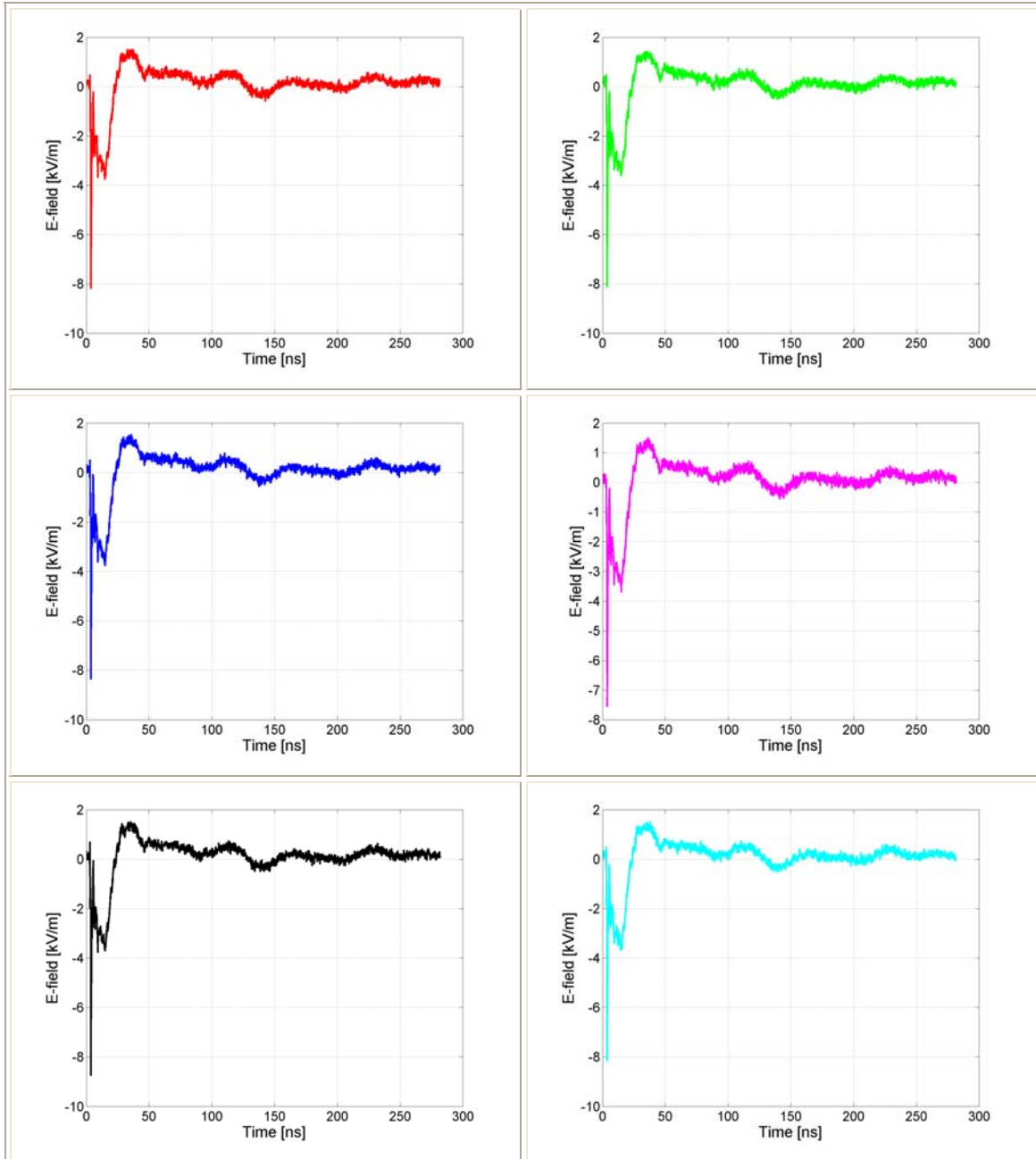


- Σημείο D1 (20 cm)



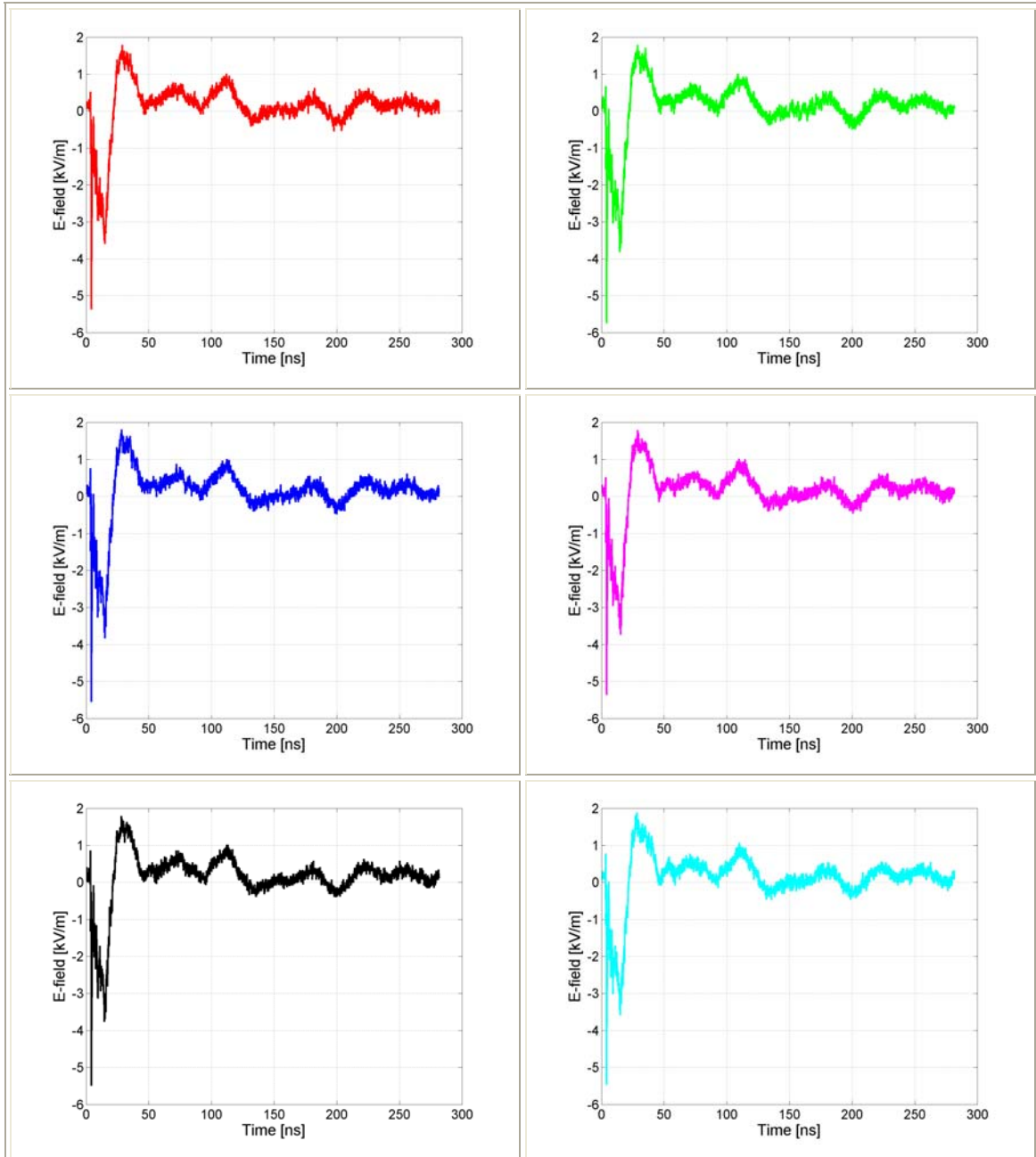
Σχήμα 5.93: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο D1 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση  $-4$  kV.

- Σημείο D2 (35 cm)



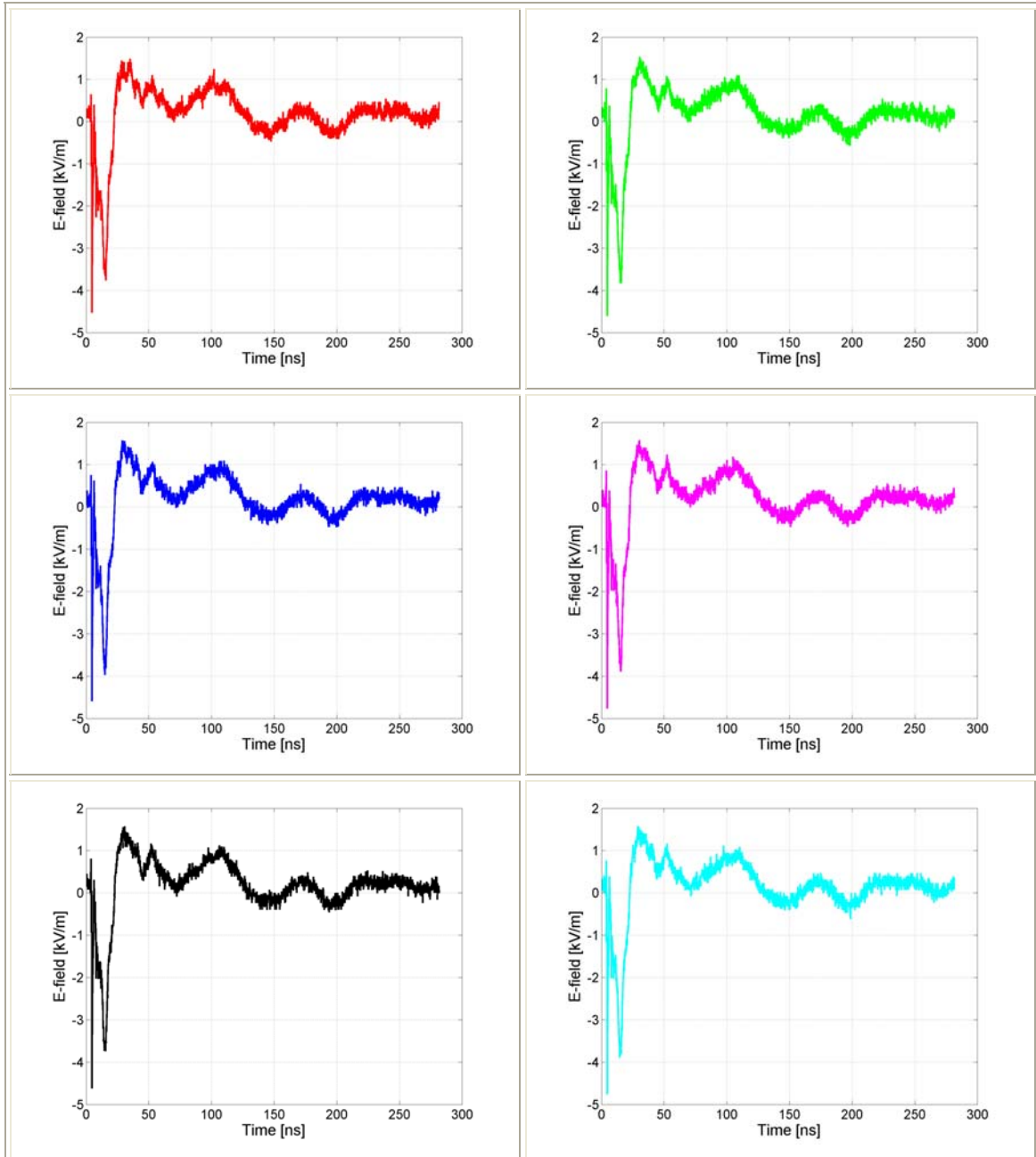
Σχήμα 5.94: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο D2 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση  $-4$  kV.

- Σημείο D3 (50 cm)



Σχήμα 5.95: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο D3 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση  $-4$  kV.

- Σημείο D4 (65 cm)



Σχήμα 5.96: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου για 6 διαδοχικές μετρήσεις στο σημείο D4 για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση  $-4$  kV.

### 5.3 Πειραματικά αποτελέσματα

Όπως αναφέρθηκε και στην αρχή του κεφαλαίου για κάθε σημείο μέτρησης έγιναν έξι ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις και κατά συνέπεια έξι μετρήσεις του παραγόμενου πεδίου. Τα αποτελέσματα αυτά ήταν διαθέσιμα σε ηλεκτρονική μορφή. Από κάθε προκύπτουσα σειρά μέτρησης υπολογίστηκε ο μέσος όρος της μέγιστης τιμής του ηλεκτρικού πεδίου. Στη συνέχεια υπολογίστηκε η διασπορά των μετρήσεων. Αφού αφαιρέθηκαν οι μέσες τιμές εκείνες, που βρίσκονταν εντός του διαστήματος εμπιστοσύνης 95% (που παρουσίαζαν δηλαδή τη μεγαλύτερη απόκλιση από το μέσο όρο των μετρήσεων) υπολογίστηκε ξανά ο μέσος όρος των μετρήσεων και υπολογίστηκε ο  $E_{\text{mesos}}$ . Τα αποτελέσματα αυτά για τις τέσσερις διαφορετικές τάσεις φόρτισης, τις τρεις διαφορετικές κατευθύνσεις και τις δύο γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες. Στους παρακάτω πίνακες με  $j$  συμβολίζεται ο αριθμός των μετρήσεων από τις συνολικά 6 που λήφθηκαν υπόψη για την εξαγωγή της μέσης μέγιστης τιμής, ενώ με έντονα bold γράμματα δηλώνει ότι βάσει αυτής της μέτρησης έχουν γίνει οι συγκρίσεις του επομένου κεφαλαίου.

				<b>Adir</b>				
				<b>2kV</b>				
<u>NSG433</u>	<b>E<sub>1max</sub></b>	<b>E<sub>2max</sub></b>	<b>E<sub>3max</sub></b>	<b>E<sub>4max</sub></b>	<b>E<sub>5max</sub></b>	<b>E<sub>6max</sub></b>	<b>E<sub>mesos</sub></b>	<b>j</b>
<b>20cm</b>	10,1640	7,7820	7,4428	9,0752	9,0752	<b>8,7158</b>	8,7158	4
<b>35cm</b>	4,0154	4,1151	<b>4,0980</b>	4,0926	4,2795	4,0856	4,0976	4
<b>50cm</b>	2,5711	2,6559	2,6459	<b>2,6848</b>	2,8542	2,7075	2,6736	4
<b>65cm</b>	2,3482	2,2957	2,2256	2,4519	<b>2,3048</b>	2,4514	2,3162	3
<u>NSG438</u>								
<b>20cm</b>	5,0972	5,1446	5,5413	<b>5,1751</b>	4,8638	5,3307	5,1870	4
<b>35cm</b>	3,1670	3,1478	<b>3,3125</b>	3,3688	3,3073	3,3277	3,3159	3
<b>50cm</b>	<b>2,4386</b>	2,2568	2,5657	2,4535	2,4644	2,1251	2,4033	4
<b>65cm</b>	2,0851	1,7923	<b>2,1040</b>	2,2613	2,2184	2,2570	2,1853	5
				<b>-2kV</b>				
<u>NSG433</u>	<b>E<sub>1max</sub></b>	<b>E<sub>2max</sub></b>	<b>E<sub>3max</sub></b>	<b>E<sub>4max</sub></b>	<b>E<sub>5max</sub></b>	<b>E<sub>6max</sub></b>	<b>E<sub>mesos</sub></b>	<b>j</b>
<b>20cm</b>	10,4601	10,2722	12,7460	8,7742	7,9826	<b>9,5129</b>	9,7549	4
<b>35cm</b>	3,8606	4,0670	<b>4,0180</b>	4,3968	4,2731	4,0078	4,0915	4
<b>50cm</b>	2,8119	2,7416	<b>2,5982</b>	2,5681	2,6459	2,5741	2,6256	5
<b>65cm</b>	1,9870	2,1207	<b>2,1358</b>	2,2203	2,3077	2,2626	2,1849	4
<u>NSG438</u>								
<b>20cm</b>	5,8754	6,3895	<b>5,8158</b>	5,9413	5,7161	6,2660	5,9747	4
<b>35cm</b>	3,5828	2,6875	3,3937	<b>3,4466</b>	3,4630	3,5506	3,4873	5
<b>50cm</b>	2,7552	2,5681	<b>2,6199</b>	2,8151	2,4752	2,6002	2,6358	4
<b>65cm</b>	2,0075	2,0553	<b>1,9066</b>	1,8146	1,7497	1,8677	1,8990	4
				<b>4kV</b>				
<u>NSG433</u>	<b>E<sub>1max</sub></b>	<b>E<sub>2max</sub></b>	<b>E<sub>3max</sub></b>	<b>E<sub>4max</sub></b>	<b>E<sub>5max</sub></b>	<b>E<sub>6max</sub></b>	<b>E<sub>mesos</sub></b>	<b>j</b>
<b>20cm</b>	12,0439	<b>12,3691</b>	11,9533	12,7770	12,4141	12,7011	12,3820	4
<b>35cm</b>	8,0513	7,4014	7,4227	7,2330	<b>7,2403</b>	7,0816	7,2758	5
<b>50cm</b>	4,9805	5,5252	5,3696	<b>5,0814</b>	4,9702	5,2225	5,1250	5
<b>65cm</b>	4,5914	4,5847	4,4449	4,4358	4,6412	<b>4,6193</b>	4,6092	4
<u>NSG438</u>								
<b>20cm</b>	<b>10,3501</b>	10,5057	10,5057	9,7276	10,3470	10,2402	10,3897	5
<b>35cm</b>	7,0768	6,1793	6,7254	6,0329	<b>6,5691</b>	6,0177	6,3049	5
<b>50cm</b>	4,5136	4,2315	<b>4,5136</b>	5,1361	4,3956	4,7148	4,5344	4
<b>65cm</b>	4,2023	3,8278	<b>3,8427</b>	4,1469	3,7743	4,5136	3,9588	5
				<b>-4kV</b>				
<u>NSG433</u>	<b>E<sub>1max</sub></b>	<b>E<sub>2max</sub></b>	<b>E<sub>3max</sub></b>	<b>E<sub>4max</sub></b>	<b>E<sub>5max</sub></b>	<b>E<sub>6max</sub></b>	<b>E<sub>mesos</sub></b>	<b>j</b>
<b>20cm</b>	22,2076	15,7144	19,7179	<b>17,5445</b>	19,0948	15,9638	18,0802	4
<b>35cm</b>	7,5661	9,8892	7,7133	8,3784	<b>8,3474</b>	8,7937	8,3082	4
<b>50cm</b>	5,1890	5,1361	5,3817	5,4291	<b>5,1361</b>	5,2036	5,1662	4
<b>65cm</b>	4,0414	4,1753	4,1634	4,0856	4,1120	<b>4,1338</b>	4,1237	4
<u>NSG438</u>								
<b>20cm</b>	12,1922	11,4037	11,8895	<b>11,5174</b>	11,2061	12,1485	11,6035	3
<b>35cm</b>	7,1595	7,1595	7,4561	6,7247	7,0038	<b>7,1596</b>	7,1205	4
<b>50cm</b>	4,5054	4,5890	<b>4,8771</b>	4,7452	4,8836	4,9103	4,8010	5
<b>65cm</b>	3,8131	3,3463	3,4499	3,4527	3,6576	<b>3,5797</b>	3,5350	4

				<b>Cdir</b>				
				<b>2kV</b>				
<u>NSG433</u>	<b>E<sub>1max</sub></b>	<b>E<sub>2max</sub></b>	<b>E<sub>3max</sub></b>	<b>E<sub>4max</sub></b>	<b>E<sub>5max</sub></b>	<b>E<sub>6max</sub></b>	<b>E<sub>mesos</sub></b>	<b>j</b>
<b>20cm</b>	6,3034	6,0013	7,2573	6,9321	6,3034	<b>6,4591</b>	6,4995	4
<b>35cm</b>	3,5131	3,4390	3,5755	3,4989	<b>3,4980</b>	3,4275	3,4872	4
<b>50cm</b>	2,9377	2,7813	2,8121	<b>2,8794</b>	2,9572	2,9180	2,8867	4
<b>65cm</b>	2,5279	2,5488	2,7043	<b>2,5904</b>	2,8209	2,6265	2,5996	5
<u>NSG438</u>								
<b>20cm</b>	5,0510	<b>5,1021</b>	4,8428	5,2930	5,3207	4,4609	5,1220	5
<b>35cm</b>	3,2382	2,9014	2,9572	3,3852	3,3463	<b>3,2685</b>	3,3095	4
<b>50cm</b>	2,4124	2,4124	2,3491	2,4932	2,3346	<b>2,4041</b>	2,3945	4
<b>65cm</b>	1,9844	1,9455	2,0338	2,0358	<b>1,9748</b>	1,9455	1,9796	2
				<b>-2kV</b>				
<u>NSG433</u>	<b>E<sub>1max</sub></b>	<b>E<sub>2max</sub></b>	<b>E<sub>3max</sub></b>	<b>E<sub>4max</sub></b>	<b>E<sub>5max</sub></b>	<b>E<sub>6max</sub></b>	<b>E<sub>mesos</sub></b>	<b>j</b>
<b>20cm</b>	6,8397	6,2468	6,5879	6,4767	<b>6,4822</b>	6,2292	6,5156	3
<b>35cm</b>	3,1701	3,1991	3,3265	<b>3,3463</b>	3,3851	3,3052	3,3260	3
<b>50cm</b>	2,7772	2,5875	2,6676	<b>2,6184</b>	2,7034	2,6836	2,6683	4
<b>65cm</b>	<b>2,5097</b>	2,4728	2,4860	2,5389	2,5486	2,4336	2,5018	4
<u>NSG438</u>								
<b>20cm</b>	5,8636	5,7824	5,6493	<b>5,8365</b>	5,8639	5,5979	5,8367	4
<b>35cm</b>	3,4241	3,1906	<b>3,4056</b>	3,2685	3,4241	3,1128	3,3426	5
<b>50cm</b>	2,2373	2,0233	2,2673	2,3440	<b>2,2957</b>	2,3393	2,2967	5
<b>65cm</b>	1,9612	<b>1,9481</b>	1,7759	1,6926	1,9999	2,1206	1,9213	4
				<b>4kV</b>				
<u>NSG433</u>	<b>E<sub>1max</sub></b>	<b>E<sub>2max</sub></b>	<b>E<sub>3max</sub></b>	<b>E<sub>4max</sub></b>	<b>E<sub>5max</sub></b>	<b>E<sub>6max</sub></b>	<b>E<sub>mesos</sub></b>	<b>j</b>
<b>20cm</b>	<b>10,9762</b>	11,1325	10,8583	11,5952	11,1617	10,8383	10,9927	5
<b>35cm</b>	6,5217	<b>6,5539</b>	6,3946	6,5989	6,5320	6,6044	6,5622	5
<b>50cm</b>	5,3261	5,3915	<b>5,3881</b>	5,1462	5,3398	5,4577	5,3614	4
<b>65cm</b>	5,1118	4,7844	5,1863	5,2690	<b>5,1750</b>	5,3307	5,2145	5
<u>NSG438</u>								
<b>20cm</b>	10,4462	9,4995	9,7275	9,6953	9,5469	<b>9,5700</b>	9,6079	5
<b>35cm</b>	6,5564	6,3180	6,2040	5,9532	6,4979	<b>6,3502</b>	6,3426	4
<b>50cm</b>	4,6233	<b>4,6692</b>	4,9273	4,6017	4,8294	4,7820	4,7260	4
<b>65cm</b>	3,7378	3,8910	3,8132	3,8910	<b>3,8679</b>	3,7354	3,8658	4
				<b>-4kV</b>				
<u>NSG433</u>	<b>E<sub>1max</sub></b>	<b>E<sub>2max</sub></b>	<b>E<sub>3max</sub></b>	<b>E<sub>4max</sub></b>	<b>E<sub>5max</sub></b>	<b>E<sub>6max</sub></b>	<b>E<sub>mesos</sub></b>	<b>j</b>
<b>20cm</b>	<b>12,9807</b>	12,3041	13,3796	11,8773	13,4051	13,2543	13,0648	5
<b>35cm</b>	6,2222	<b>6,1335</b>	6,1064	6,3034	6,0809	6,4509	6,1693	5
<b>50cm</b>	4,8850	5,0316	5,0267	5,0972	<b>5,0972</b>	5,1173	5,0740	5
<b>65cm</b>	4,6108	4,7139	<b>4,7859</b>	4,8638	4,9690	4,7096	4,7683	4
<u>NSG438</u>								
<b>20cm</b>	12,2998	<b>12,1825</b>	11,7308	11,5830	11,5672	12,3649	12,0710	3
<b>35cm</b>	6,7558	6,3588	<b>6,7089</b>	6,8482	6,9345	6,5442	6,7143	4
<b>50cm</b>	4,7154	4,3692	4,1913	4,6692	4,771035	<b>4,5136</b>	4,5668	4
<b>65cm</b>	3,8791	3,7296	<b>3,6575</b>	3,6499	3,7554	3,5749	3,6981	4

				<b>Ddir</b>				
				<b>2kV</b>				
<b>NSG433</b>	<b>E<sub>1max</sub></b>	<b>E<sub>2max</sub></b>	<b>E<sub>3max</sub></b>	<b>E<sub>4max</sub></b>	<b>E<sub>5max</sub></b>	<b>E<sub>6max</sub></b>	<b>E<sub>mesos</sub></b>	<b>j</b>
<b>20cm</b>	6,2365	6,7703	6,7703	<b>6,5405</b>	6,8488	6,3594	6,6101	4
<b>35cm</b>	4,2801	4,1758	3,5846	<b>3,9688</b>	3,7907	4,2132	4,0371	4
<b>50cm</b>	3,4715	3,5490	<b>3,6202</b>	3,7946	3,7974	3,9594	3,6903	4
<b>65cm</b>	<b>3,5408</b>	3,5426	3,5211	3,5277	3,5679	3,6515	3,5400	5
<b>NSG438</b>								
<b>20cm</b>	5,5426	5,7587	5,7569	5,5851	5,8754	<b>5,5745</b>	5,6689	4
<b>35cm</b>	<b>4,1783</b>	4,2800	4,0032	3,8910	4,2038	4,3370	4,1663	4
<b>50cm</b>	3,1166	3,2295	3,0213	2,9961	3,0484	<b>3,0739</b>	3,0650	4
<b>65cm</b>	2,4691	<b>2,7312</b>	2,8569	2,7278	2,6374	2,8863	2,7383	4
				<b>-2kV</b>				
<b>NSG433</b>	<b>E<sub>1max</sub></b>	<b>E<sub>2max</sub></b>	<b>E<sub>3max</sub></b>	<b>E<sub>4max</sub></b>	<b>E<sub>5max</sub></b>	<b>E<sub>6max</sub></b>	<b>E<sub>mesos</sub></b>	<b>j</b>
<b>20cm</b>	<b>7,4002</b>	6,5211	7,6853	7,5923	7,1229	8,0100	7,4502	4
<b>35cm</b>	3,7968	3,9733	3,9818	<b>4,3023</b>	4,0202	4,1588	4,0328	4
<b>50cm</b>	4,0077	3,3043	3,3159	3,0152	3,0851	<b>3,0945</b>	3,1630	5
<b>65cm</b>	3,6293	3,8001	3,7767	3,3937	<b>3,2295</b>	3,1535	3,4175	3
<b>NSG438</b>								
<b>20cm</b>	6,1633	6,3195	6,0312	5,6419	<b>5,7198</b>	5,0194	5,8890	4
<b>35cm</b>	4,1245	<b>3,8986</b>	3,9716	3,8910	3,8910	3,7354	3,9130	4
<b>50cm</b>	2,6070	3,3141	3,2574	<b>2,8961</b>	2,9961	2,2957	2,9391	4
<b>65cm</b>	2,6479	2,7623	2,4463	<b>2,5658</b>	2,5874	2,3121	2,5618	4
				<b>4kV</b>				
<b>NSG433</b>	<b>E<sub>1max</sub></b>	<b>E<sub>2max</sub></b>	<b>E<sub>3max</sub></b>	<b>E<sub>4max</sub></b>	<b>E<sub>5max</sub></b>	<b>E<sub>6max</sub></b>	<b>E<sub>mesos</sub></b>	<b>j</b>
<b>20cm</b>	<b>11,0164</b>	10,6613	11,1283	11,5861	11,5952	10,9726	11,0391	3
<b>35cm</b>	<b>7,3789</b>	7,0695	7,7820	7,9255	7,3151	7,3151	7,4478	4
<b>50cm</b>	8,9816	7,2373	6,7703	<b>6,6147</b>	6,3034	6,3235	6,6498	5
<b>65cm</b>	6,3658	6,2475	6,0690	6,1627	6,1525	<b>6,2156</b>	6,1944	4
<b>NSG438</b>								
<b>20cm</b>	10,5221	10,2722	<b>10,7392</b>	10,8948	9,9573	10,9204	10,6697	5
<b>35cm</b>	7,9188	7,4850	<b>7,6227</b>	7,4707	7,6498	7,8018	7,6398	4
<b>50cm</b>	5,6137	5,3538	5,4751	5,4322	5,2985	<b>5,3988</b>	5,4150	4
<b>65cm</b>	4,0281	4,2403	4,8237	4,7509	<b>4,6692</b>	5,0583	4,6210	4
				<b>-4kV</b>				
<b>NSG433</b>	<b>E<sub>1max</sub></b>	<b>E<sub>2max</sub></b>	<b>E<sub>3max</sub></b>	<b>E<sub>4max</sub></b>	<b>E<sub>5max</sub></b>	<b>E<sub>6max</sub></b>	<b>E<sub>mesos</sub></b>	<b>j</b>
<b>20cm</b>	13,7474	12,9770	12,7412	<b>12,7948</b>	12,5255	12,9577	12,8677	4
<b>35cm</b>	7,4646	7,7741	7,5485	7,5485	<b>7,6421</b>	7,8519	7,6283	4
<b>50cm</b>	6,3143	6,0699	5,9143	<b>6,2505</b>	6,3003	6,0699	6,1727	4
<b>65cm</b>	8,5724	7,8598	<b>7,2811</b>	7,4896	7,1485	7,2780	7,4114	5
<b>NSG438</b>								
<b>20cm</b>	11,9806	13,0379	11,7143	<b>12,0962</b>	12,0244	12,3734	12,1186	4
<b>35cm</b>	<b>8,1881</b>	8,1280	8,3657	7,5580	8,7617	8,1720	8,2134	4
<b>50cm</b>	5,3696	5,7470	5,5496	5,3626	5,4921	<b>5,4663</b>	5,4480	5
<b>65cm</b>	4,5230	<b>4,6032</b>	4,5862	4,7579	4,6157	4,7631	4,6017	3



# Κεφάλαιο 6

## Σύγκριση αποτελεσμάτων

### 6.1 Εισαγωγή

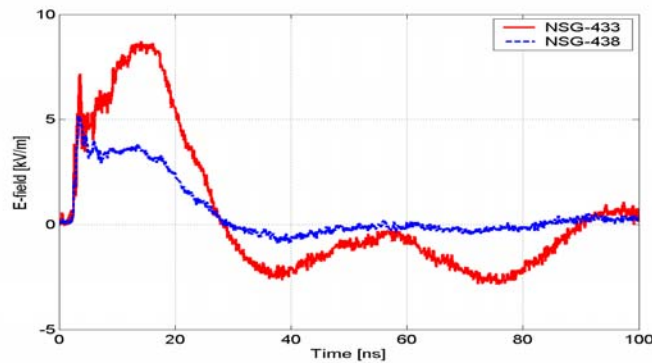
Στο προηγούμενο κεφάλαιο παρουσιάστηκαν όλα τα αποτελέσματα των μετρήσεων για τις δυο γεννήτριες που χρησιμοποιήσαμε, για τέσσερις τάσεις εκφόρτισης και για όλες τις αποστάσεις από το σημείο εκφόρτισης. Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται συγκρίσεις των αποτελεσμάτων αυτών.

### 6.2 Σύγκριση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου των δυο γεννητριών σε κάθε σημείο παρατήρησης για εκφορτίσεις επαφής

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται συγκρίσεις της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου των δυο γεννητριών σε κάθε σημείο παρατήρησης για εκφορτίσεις επαφής, ώστε να βρεθούν τυχόν διαφορές τους. Ο αισθητήρας για τη μέτρηση του πεδίου τοποθετήθηκε σε διαδοχικές αποστάσεις [20 cm(1), 35 cm(2), 50 cm(3) και 65 cm(4)] σε τρεις κατευθύνσεις (Κατεύθυνση A, Κατεύθυνση C και Κατεύθυνση D) οι οποίες είναι κάθετες μεταξύ τους ως προς το σημείο εκφόρτισης. Οι αποστάσεις αυτές έχουν παρουσιαστεί στο Σχήμα 4.2 του Κεφαλαίου 4. Τα γραφήματα που προέκυψαν ύστερα από επεξεργασία των πειραματικών αποτελεσμάτων με το πρόγραμμα MATLAB για εκφορτίσεις επαφής για τις γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων NSG-433 και NSG-438 υπό τάσεις  $\pm 2$  kV και  $\pm 4$  kV είναι τα ακόλουθα:

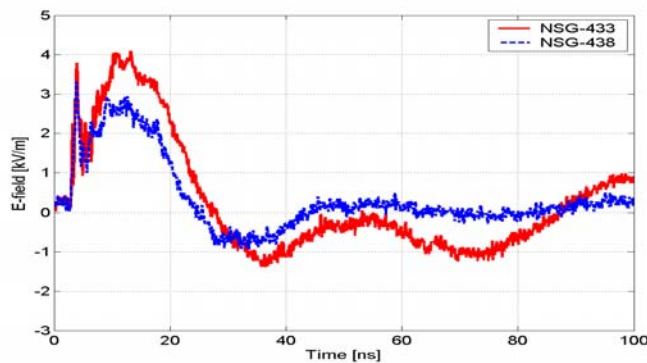
### 6.2.1 Συγκρίσεις για τάση φόρτισης +2 kV

- **Σημείο A1 (20 cm)**



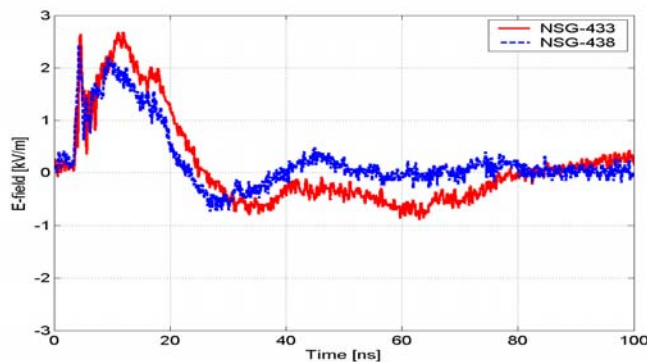
Σχήμα 6.1: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο A1 (20 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τις γεννήτριες NSG-433 και NSG-438 υπό τάση +2 kV.

- **Σημείο A2 (35 cm)**



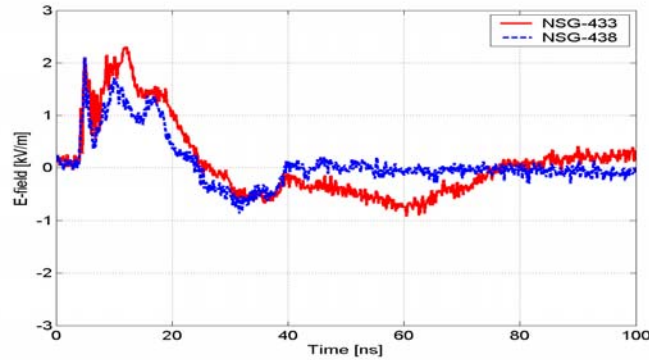
Σχήμα 6.2: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο A2 (35 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τις γεννήτριες NSG-433 και NSG-438 υπό τάση +2 kV.

- **Σημείο A3 (50 cm)**



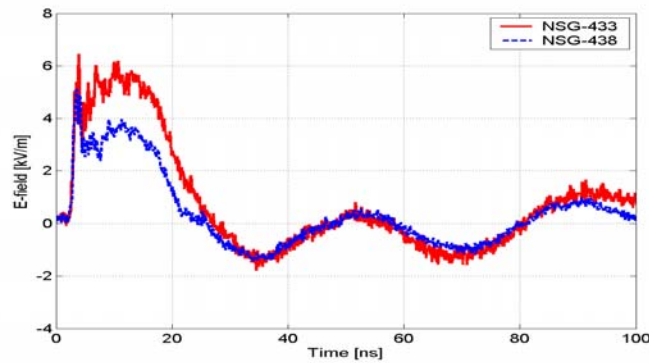
Σχήμα 6.3: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο A3 (50 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τις γεννήτριες NSG-433 και NSG-438 υπό τάση +2 kV.

- **Σημείο A4 (65 cm)**



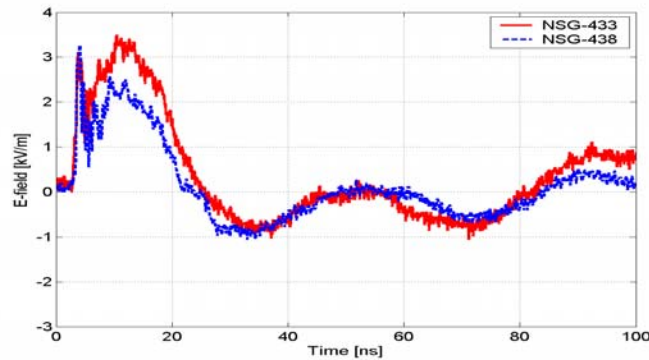
Σχήμα 6.4: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο A4 (65 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τις γεννήτριες NSG-433 και NSG-438 υπό τάση +2 kV.

- **Σημείο C1 (20 cm)**



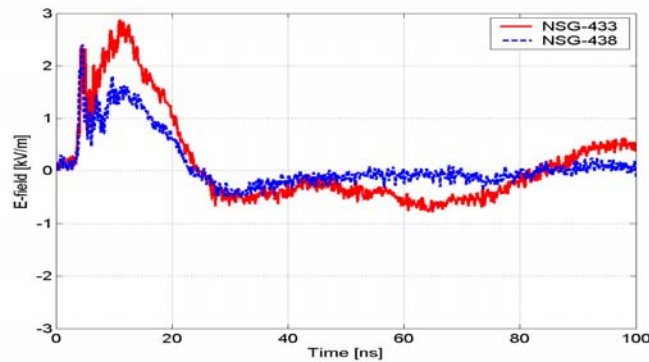
Σχήμα 6.5: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο C1 (20 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τις γεννήτριες NSG-433 και NSG-438 υπό τάση +2 kV.

- **Σημείο C2 (35 cm)**



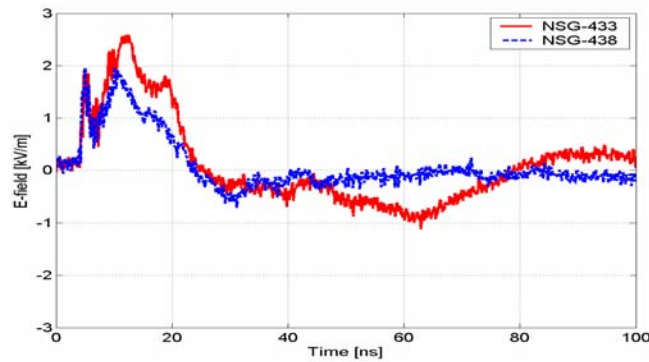
Σχήμα 6.6: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο C2 (35 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τις γεννήτριες NSG-433 και NSG-438 υπό τάση +2 kV.

- **Σημείο C3 (50 cm)**



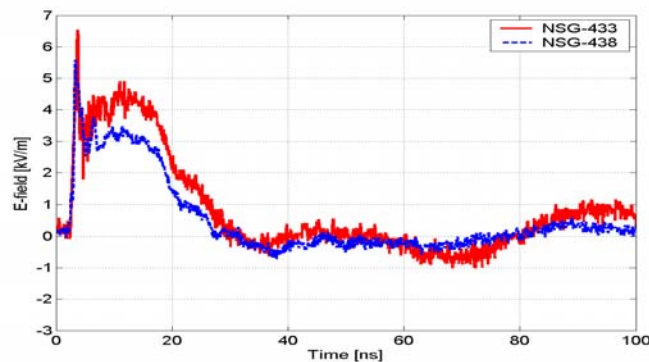
Σχήμα 6.7: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο C3 (50 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τις γεννήτριες NSG-433 και NSG-438 υπό τάση +2 kV.

- **Σημείο C4 (65 cm)**



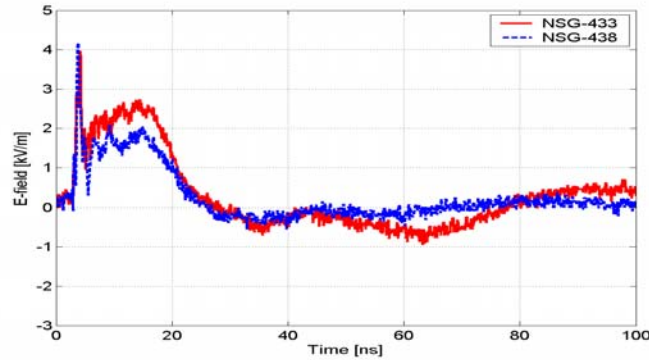
Σχήμα 6.8: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο C4 (65 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τις γεννήτριες NSG-433 και NSG-438 υπό τάση +2 kV.

- **Σημείο D1 (20 cm)**



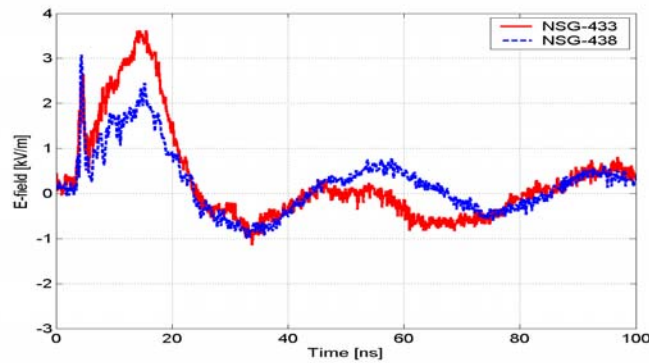
Σχήμα 6.9: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο D1 (20 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τις γεννήτριες NSG-433 και NSG-438 υπό τάση +2 kV.

- **Σημείο D2 (35 cm)**



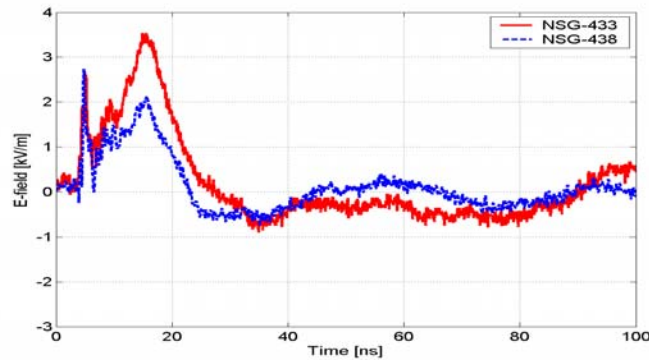
Σχήμα 6.10: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο D2 (35 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τις γεννήτριες NSG-433 και NSG-438 υπό τάση +2 kV.

- **Σημείο D3 (50 cm)**



Σχήμα 6.11: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο D3 (50 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τις γεννήτριες NSG-433 και NSG-438 υπό τάση +2 kV.

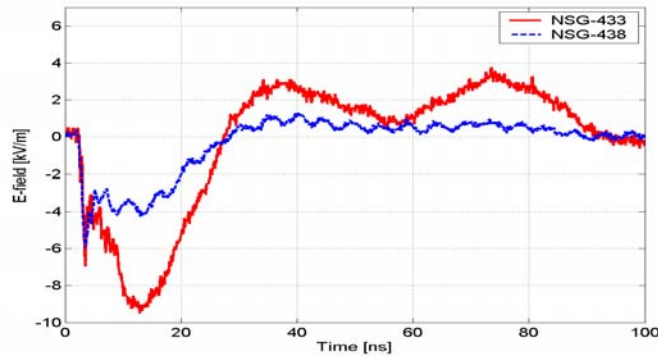
- **Σημείο D4 (65 cm)**



Σχήμα 6.12: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο D4 (65 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τις γεννήτριες NSG-433 και NSG-438 υπό τάση +2 kV.

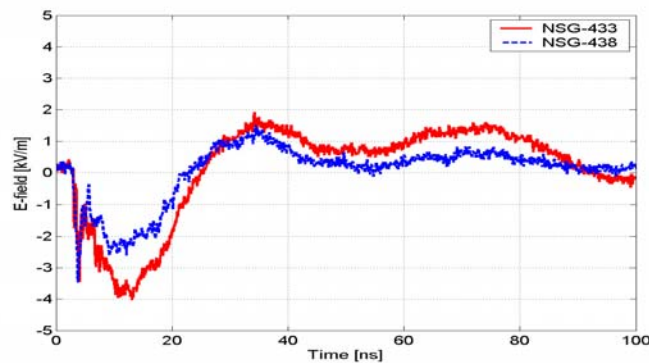
## 6.2.2 Συγκρίσεις για τάση φόρτισης -2 kV

- **Σημείο A1 (20 cm)**



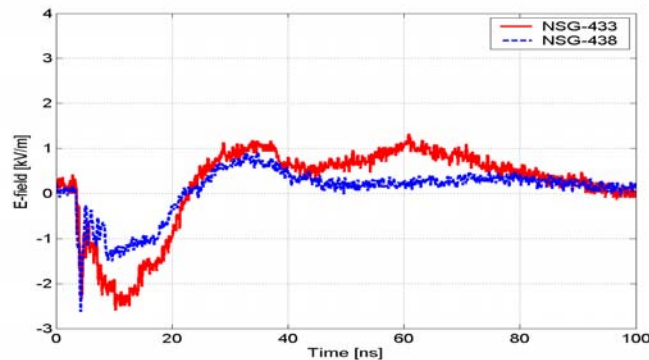
Σχήμα 6.13: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο A1 (20 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τις γεννήτριες NSG-433 και NSG-438 υπό τάση -2 kV.

- **Σημείο A2 (35 cm)**



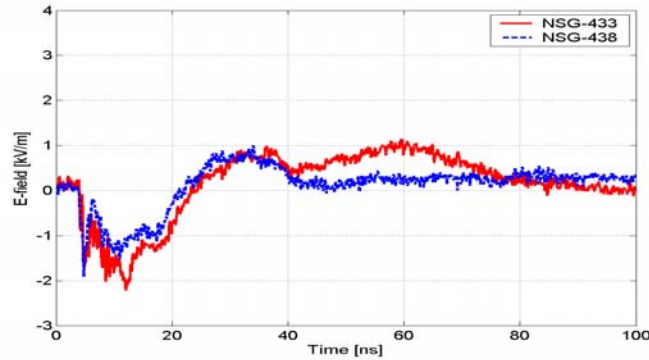
Σχήμα 6.14: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο A2 (35 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τις γεννήτριες NSG-433 και NSG-438 υπό τάση -2 kV.

- **Σημείο A3 (50 cm)**



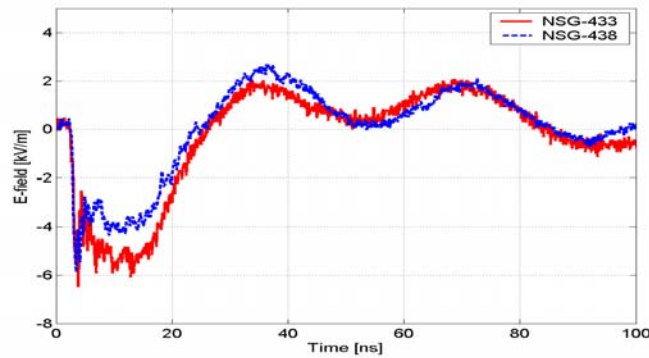
Σχήμα 6.15: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο A3 (50 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τις γεννήτριες NSG-433 και NSG-438 υπό τάση -2 kV.

- **Σημείο A4 (65 cm)**



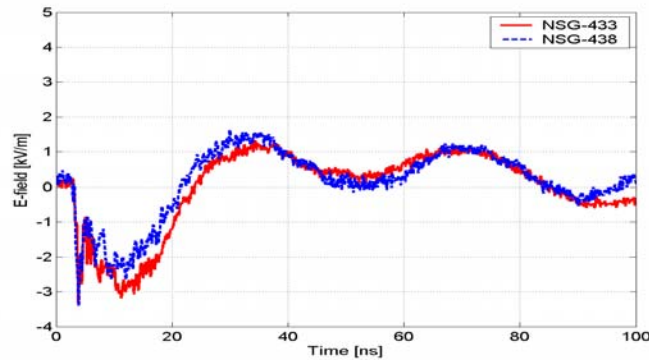
Σχήμα 6.16: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο A4 (65 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τις γεννήτριες NSG-433 και NSG-438 υπό τάση -2 kV.

- **Σημείο C1 (20 cm)**



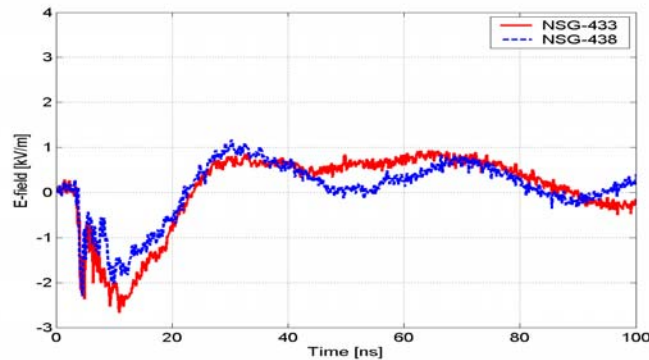
Σχήμα 6.17: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο C1 (20 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τις γεννήτριες NSG-433 και NSG-438 υπό τάση -2 kV.

- **Σημείο C2 (35 cm)**



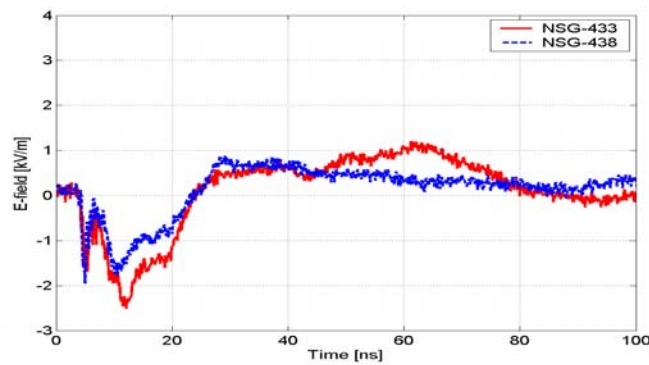
Σχήμα 6.18: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο C2 (35 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τις γεννήτριες NSG-433 και NSG-438 υπό τάση -2 kV.

- **Σημείο C3 (50 cm)**



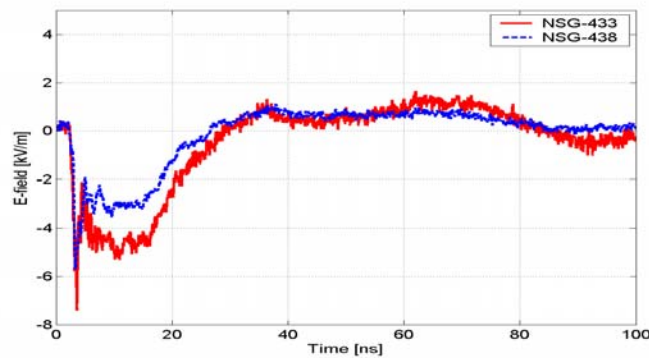
Σχήμα 6.19: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο C3 (50 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τις γεννήτριες NSG-433 και NSG-438 υπό τάση -2 kV.

- **Σημείο C4 (65 cm)**



Σχήμα 6.20: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο C4 (65 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τις γεννήτριες NSG-433 και NSG-438 υπό τάση -2 kV.

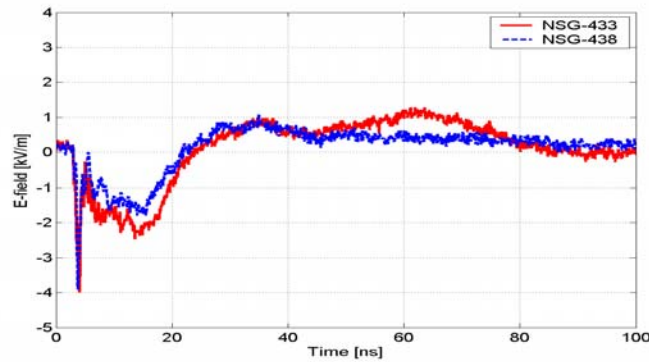
- **Σημείο D1 (20 cm)**



Σχήμα 6.21: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο D1 (20 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τις γεννήτριες NSG-433 και NSG-438 υπό τάση -2 kV.

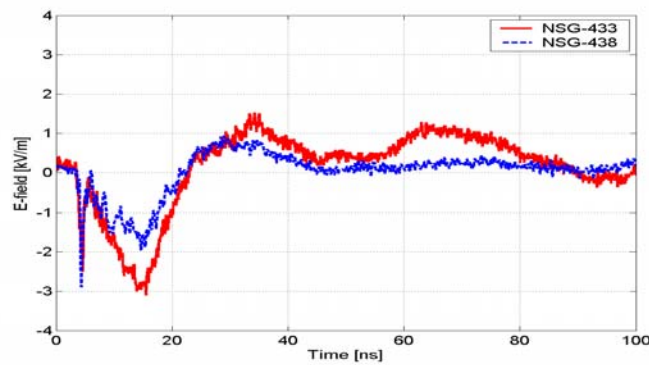


- **Σημείο D2 (35 cm)**



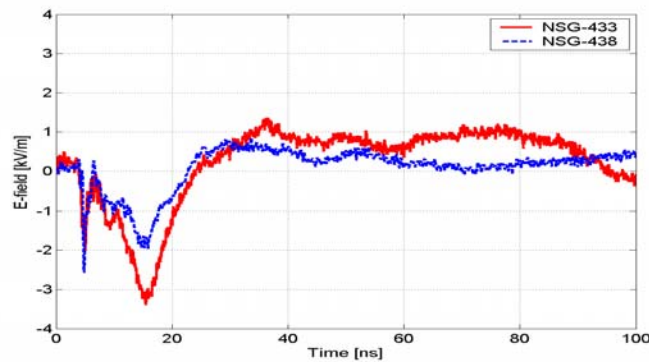
Σχήμα 6.22: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο D2 (35 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τις γεννήτριες NSG-433 και NSG-438 υπό τάση -2 kV.

- **Σημείο D3 (50 cm)**



Σχήμα 6.23: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο D3 (50 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τις γεννήτριες NSG-433 και NSG-438 υπό τάση -2 kV.

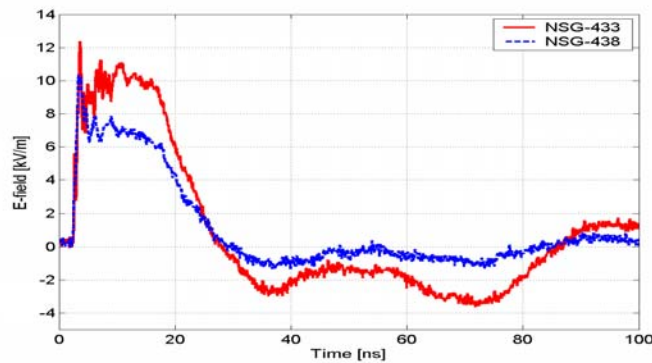
- **Σημείο D4 (65 cm)**



Σχήμα 6.24: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο D4 (65 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τις γεννήτριες NSG-433 και NSG-438 υπό τάση -2 kV.

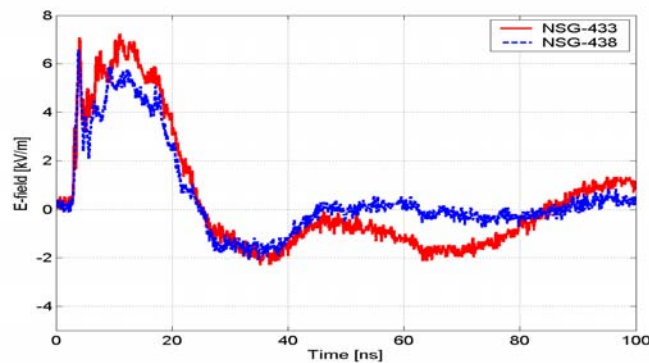
### 6.2.3 Συγκρίσεις για τάση φόρτισης +4 kV

- **Σημείο A1 (20 cm)**



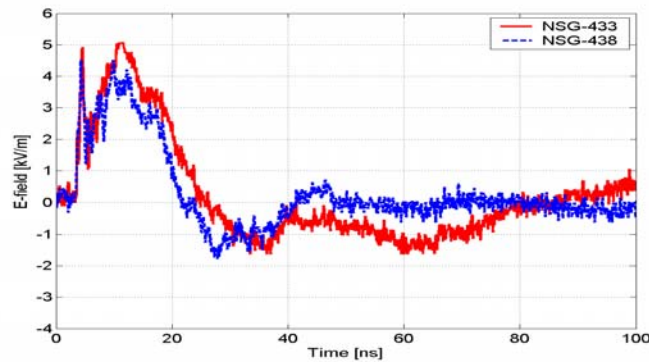
Σχήμα 6.25: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο A1 (20 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τις γεννήτριες NSG-433 και NSG-438 υπό τάση +4 kV.

- **Σημείο A2 (35 cm)**



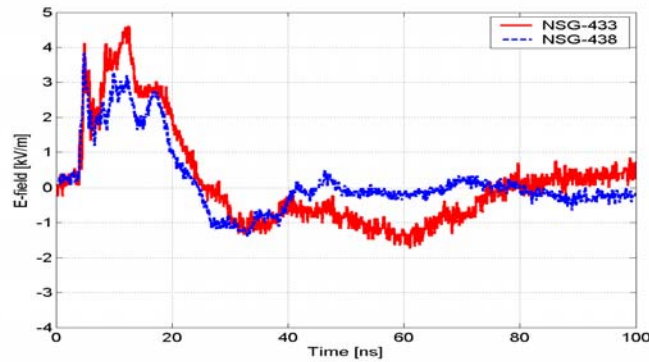
Σχήμα 6.26: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο A2 (35 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τις γεννήτριες NSG-433 και NSG-438 υπό τάση +4 kV.

- **Σημείο A3 (50 cm)**



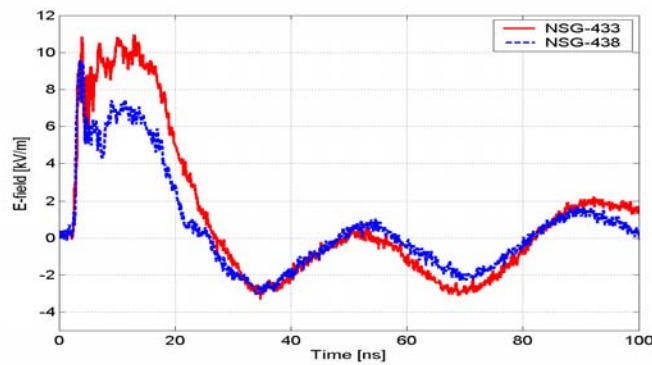
Σχήμα 6.27: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο A3 (50 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τις γεννήτριες NSG-433 και NSG-438 υπό τάση +4 kV.

- **Σημείο A4 (65 cm)**



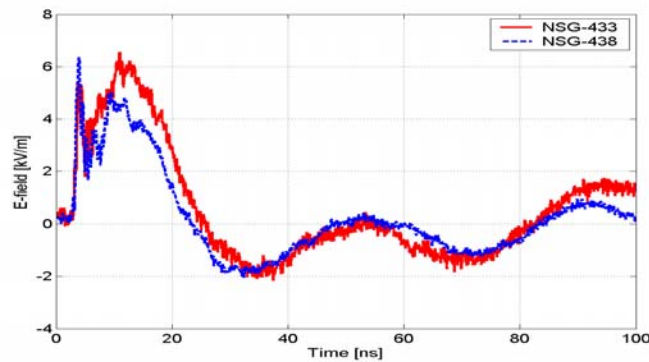
Σχήμα 6.28: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο A4 (65 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τις γεννήτριες NSG-433 και NSG-438 υπό τάση +4 kV.

- **Σημείο C1 (20 cm)**



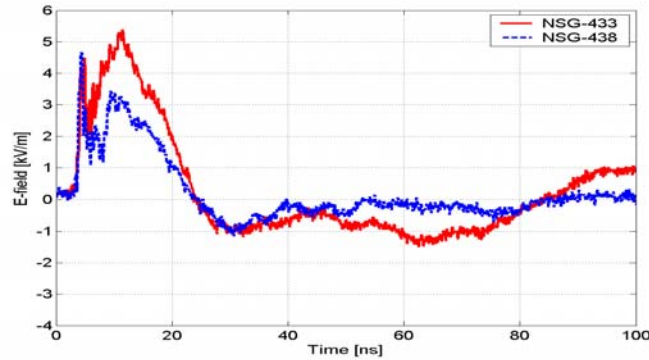
Σχήμα 6.29: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο C1 (20 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τις γεννήτριες NSG-433 και NSG-438 υπό τάση +4 kV.

- **Σημείο C2 (35 cm)**



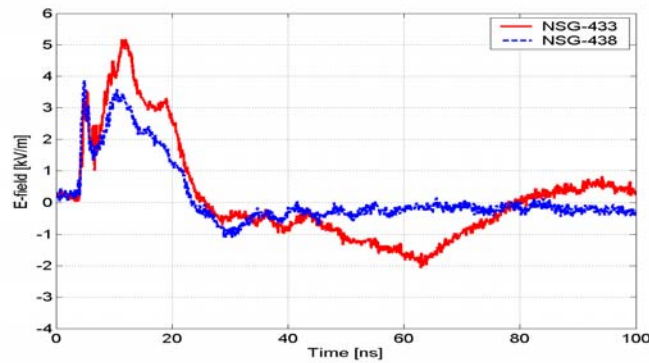
Σχήμα 6.30: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο C2 (35 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τις γεννήτριες NSG-433 και NSG-438 υπό τάση +4 kV.

- **Σημείο C3 (50 cm)**



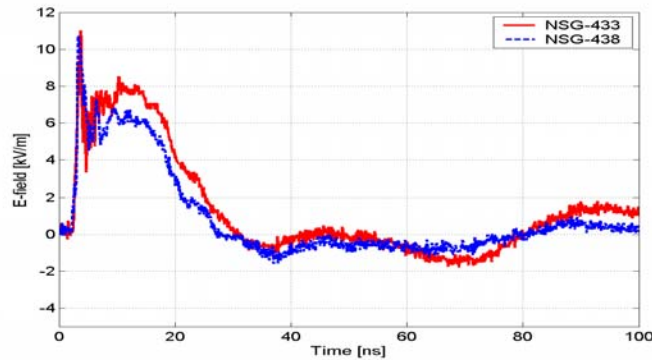
Σχήμα 6.31: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο C3 (50 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τις γεννήτριες NSG-433 και NSG-438 υπό τάση +4 kV.

- **Σημείο C4 (65 cm)**



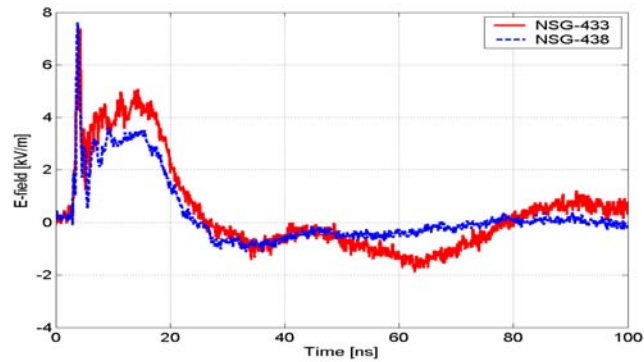
Σχήμα 6.32: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο C4 (65 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τις γεννήτριες NSG-433 και NSG-438 υπό τάση +4 kV.

- **Σημείο D1 (20 cm)**



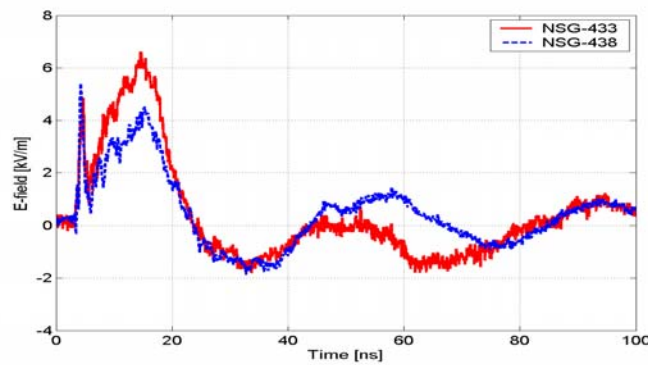
Σχήμα 6.33: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο D1 (20 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τις γεννήτριες NSG-433 και NSG-438 υπό τάση +4 kV.

- **Σημείο D2 (35 cm)**



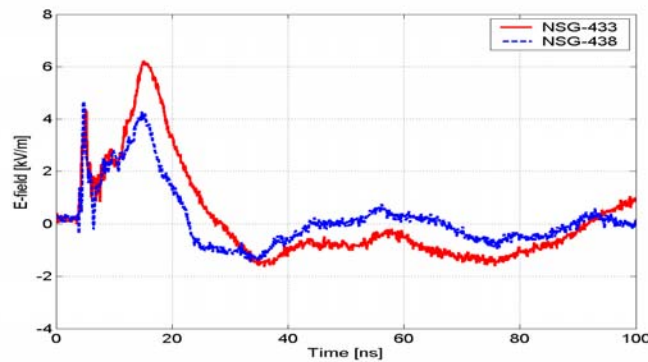
Σχήμα 6.34: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο D2 (35 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τις γεννήτριες NSG-433 και NSG-438 υπό τάση +4 kV.

- **Σημείο D3 (50 cm)**



Σχήμα 6.35: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο D3 (50 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τις γεννήτριες NSG-433 και NSG-438 υπό τάση +4 kV.

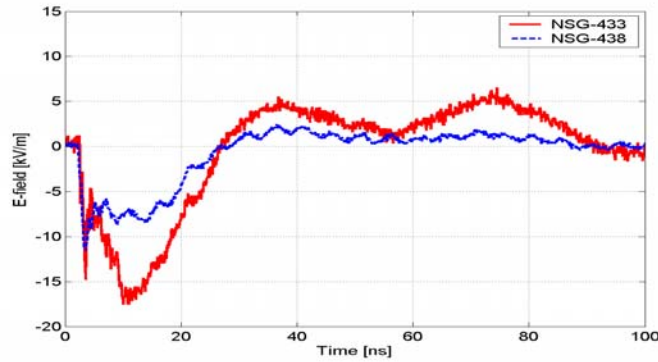
- **Σημείο D4 (65 cm)**



Σχήμα 6.36: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο D4 (65 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τις γεννήτριες NSG-433 και NSG-438 υπό τάση +4 kV.

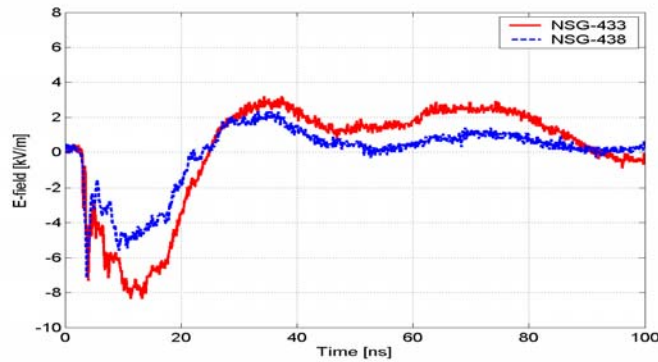
### 6.2.4 Συγκρίσεις για τάση φόρτισης -4 kV

- **Σημείο A1 (20 cm)**



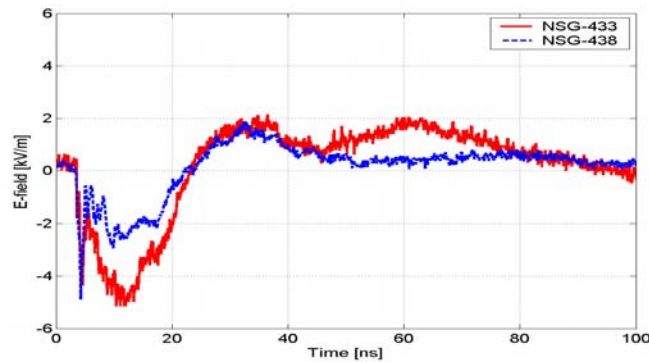
Σχήμα 6.37: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο A1 (20 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τις γεννήτριες NSG-433 και NSG-438 υπό τάση -4 kV.

- **Σημείο A2 (35 cm)**



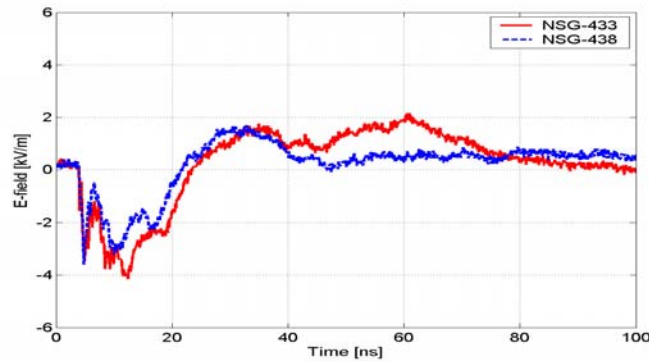
Σχήμα 6.38: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο A2 (35 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τις γεννήτριες NSG-433 και NSG-438 υπό τάση -4 kV.

- **Σημείο A3 (50 cm)**



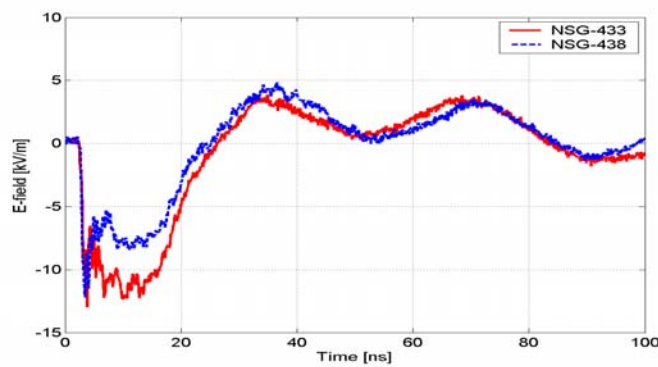
Σχήμα 6.39: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο A3 (50 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τις γεννήτριες NSG-433 και NSG-438 υπό τάση -4 kV.

- **Σημείο A4 (65 cm)**



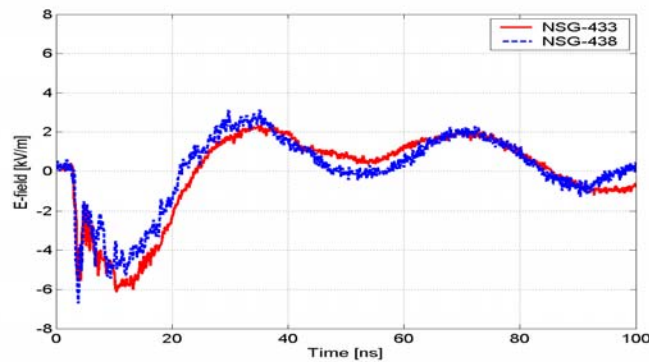
Σχήμα 6.40: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο A4 (65 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τις γεννήτριες NSG-433 και NSG-438 υπό τάση -4 kV.

- **Σημείο C1 (20 cm)**



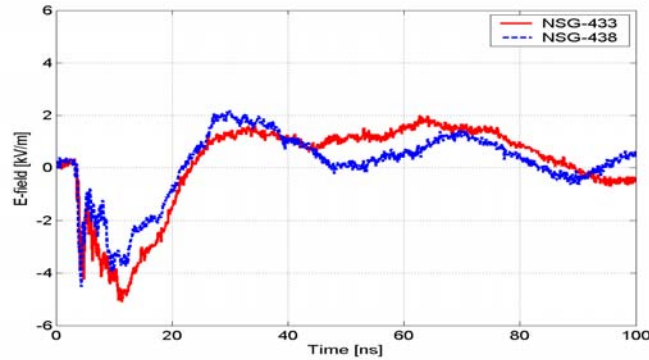
Σχήμα 6.41: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο C1 (20 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τις γεννήτριες NSG-433 και NSG-438 υπό τάση -4 kV.

- **Σημείο C2 (35 cm)**



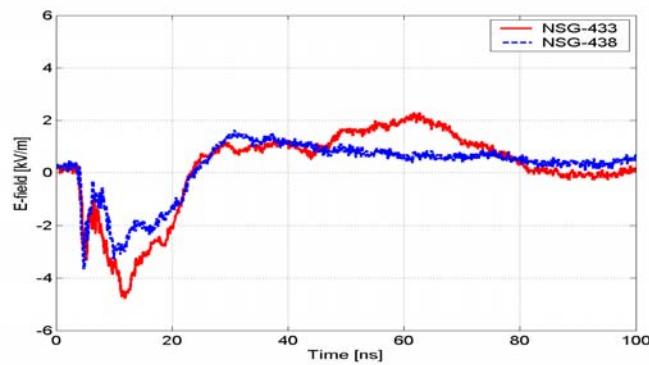
Σχήμα 6.42: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο C2 (35 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τις γεννήτριες NSG-433 και NSG-438 υπό τάση -4 kV.

- **Σημείο C3 (50 cm)**



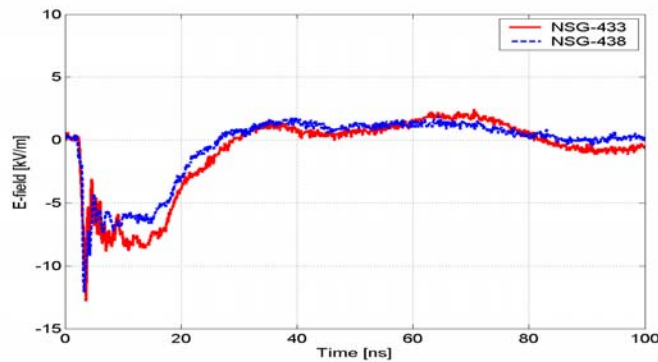
Σχήμα 6.43: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο C3 (50 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τις γεννήτριες NSG-433 και NSG-438 υπό τάση -4 kV.

- **Σημείο C4 (65 cm)**



Σχήμα 6.44: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο C4 (65 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τις γεννήτριες NSG-433 και NSG-438 υπό τάση -4 kV.

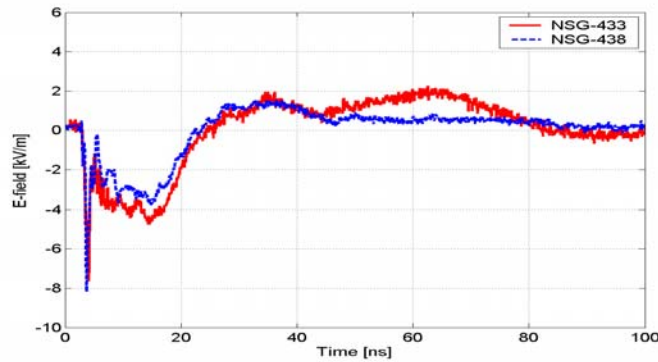
- **Σημείο D1 (20 cm)**



Σχήμα 6.45: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο D1 (20 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τις γεννήτριες NSG-433 και NSG-438 υπό τάση -4 kV.

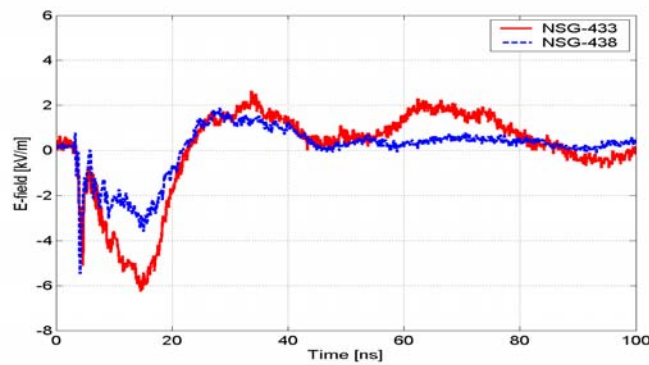


- **Σημείο D2 (35 cm)**



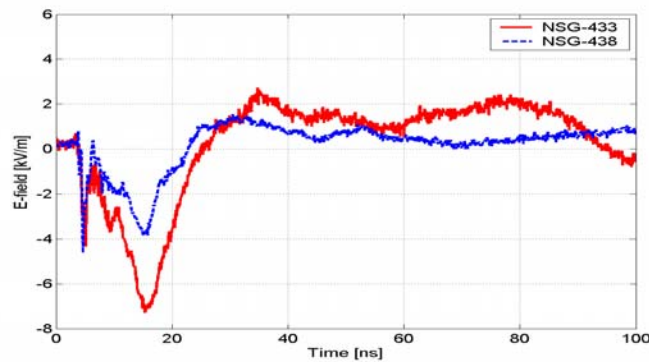
Σχήμα 6.46: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο D2 (35 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τις γεννήτριες NSG-433 και NSG-438 υπό τάση -4 kV.

- **Σημείο D3 (50 cm)**



Σχήμα 6.47: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο D3 (50 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τις γεννήτριες NSG-433 και NSG-438 υπό τάση -4 kV.

- **Σημείο D4 (65 cm)**



Σχήμα 6.48: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο D4 (65 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τις γεννήτριες NSG-433 και NSG-438 υπό τάση -4 kV.

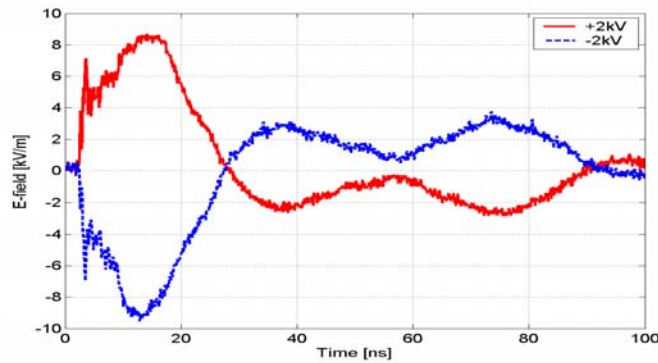
### 6.3 Σύγκριση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου για την ίδια γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων στην ίδια κατεύθυνση αλλά με αντίθετη τάση φόρτισης.

Στην παράγραφο αυτή θα παρουσιαστούν τα συγκριτικά γραφήματα της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου για κάθε σημείο παρατήρησης για ίδια κατεύθυνση αλλά αντίθετη τάση φόρτισης και με τις δυο γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων NSG-433 και NSG-438.

#### 6.3.1 Γεννήτρια NSG-433

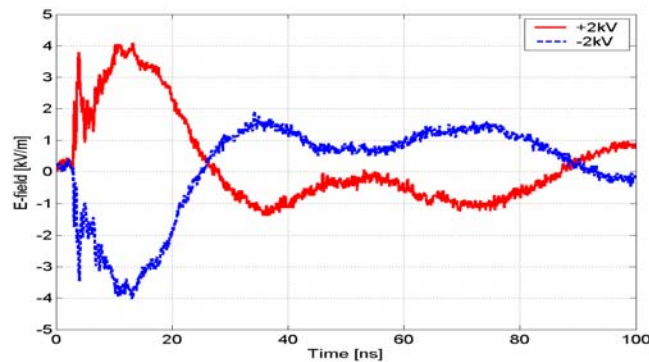
##### Για τάση φόρτισης +2kV και -2kV

- Σημείο A1 (20 cm)



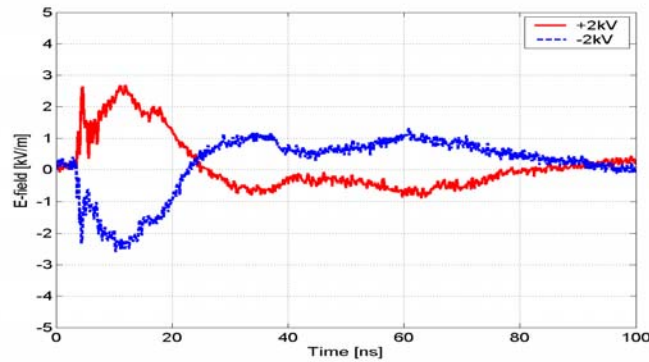
Σχήμα 6.49: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο A1 (20 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση +2kV και -2kV.

- Σημείο A2 (35 cm)



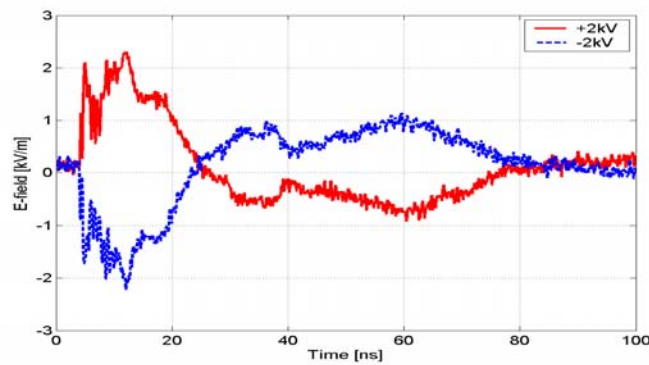
Σχήμα 6.50: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο A2 (35 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση +2kV και -2kV.

- **Σημείο A3 (50 cm)**



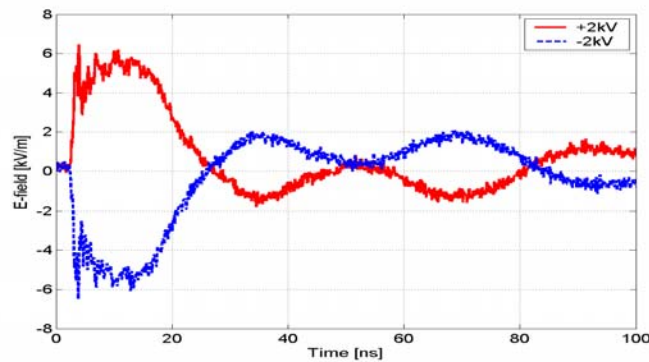
Σχήμα 6.51: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο A3 (50 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση +2kV και -2kV.

- **Σημείο A4 (65 cm)**



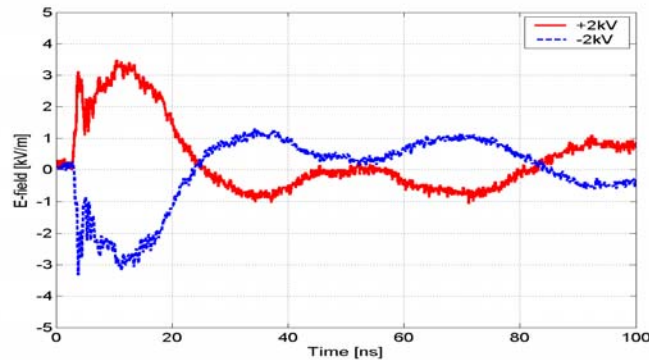
Σχήμα 6.52: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο A4 (65 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση +2kV και -2kV.

- **Σημείο C1 (20 cm)**



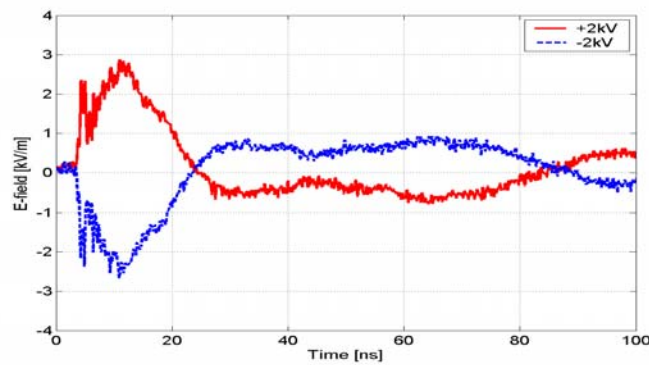
Σχήμα 6.53: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο C1 (20 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση +2kV και -2kV.

- **Σημείο C2 (35 cm)**



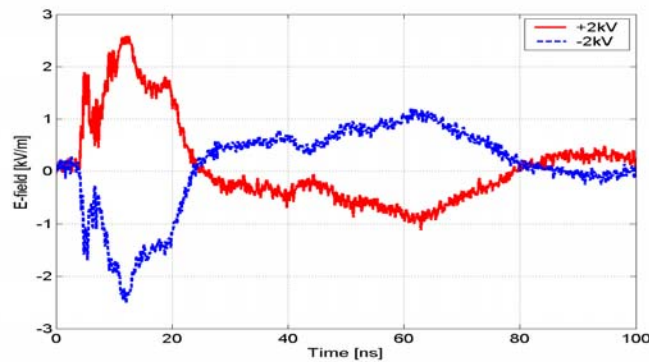
Σχήμα 6.54: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο C2 (35 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση +2kV και -2kV.

- **Σημείο C3 (50 cm)**



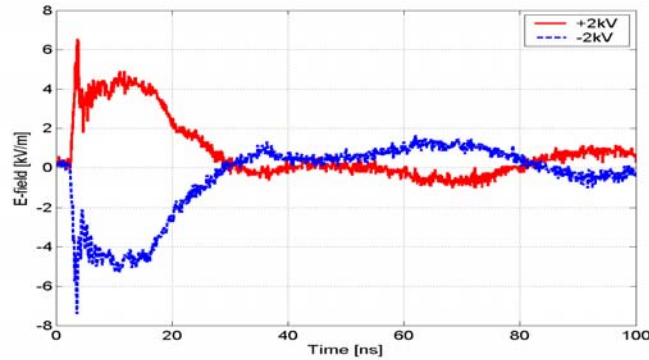
Σχήμα 6.55: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο C3 (50 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση +2kV και -2kV.

- **Σημείο C4 (65 cm)**



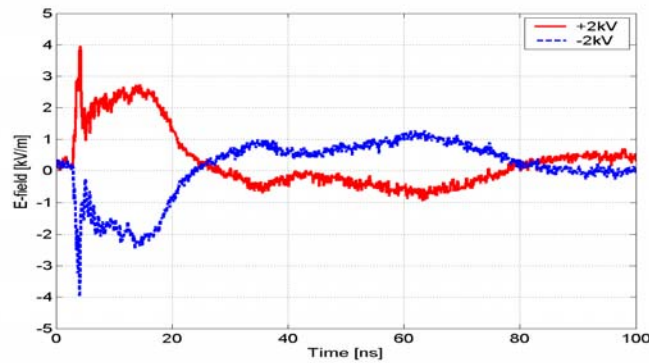
Σχήμα 6.56: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο C4 (65 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση +2kV και -2kV.

- **Σημείο D1 (20 cm)**



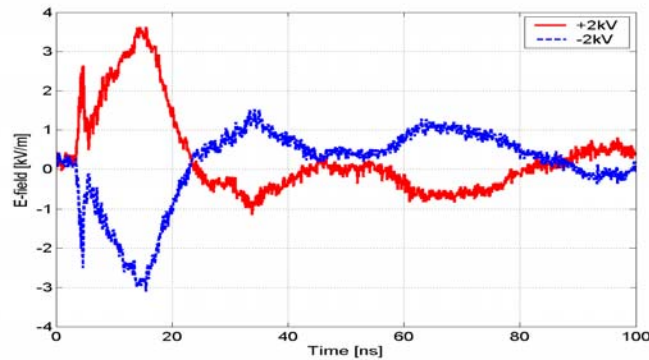
Σχήμα 6.57: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο D1 (20 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση +2kV και -2kV.

- **Σημείο D2 (35 cm)**



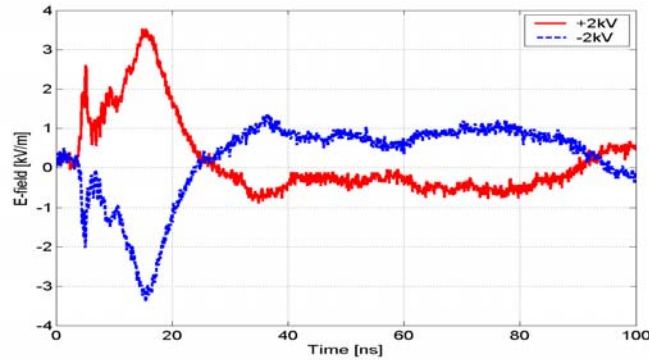
Σχήμα 6.58: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο D2 (35 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση +2kV και -2kV.

- **Σημείο D3 (50 cm)**



Σχήμα 6.59: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο D3 (50 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση +2kV και -2kV.

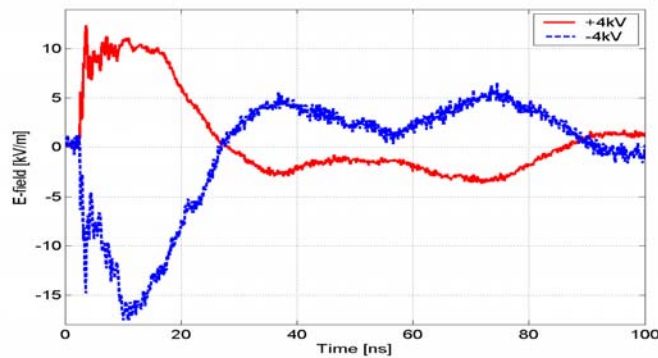
- **Σημείο D4 (65 cm)**



Σχήμα 6.60: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο D4 (65 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση +2kV και -2kV.

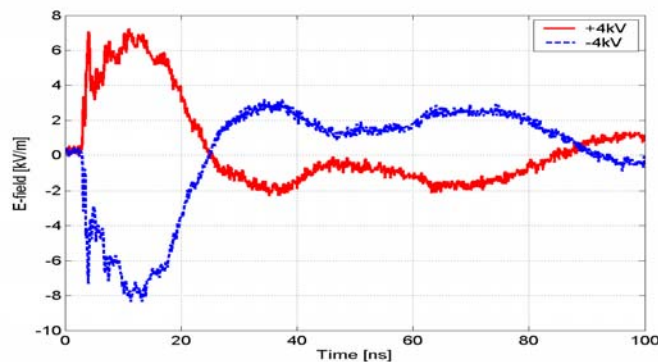
**Για τάση φόρτισης +4kV και -4kV**

- **Σημείο A1 (20 cm)**



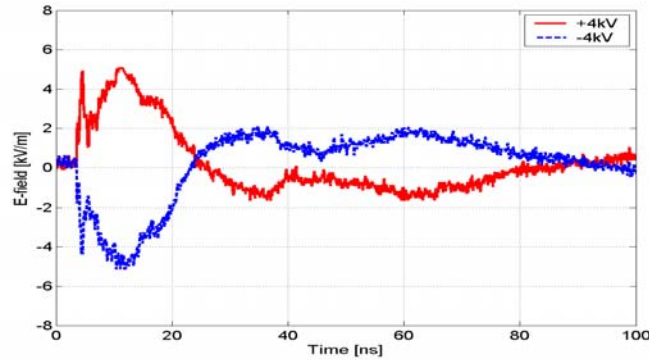
Σχήμα 6.61: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο A1 (20 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση +4kV και -4kV.

- **Σημείο A2 (35 cm)**



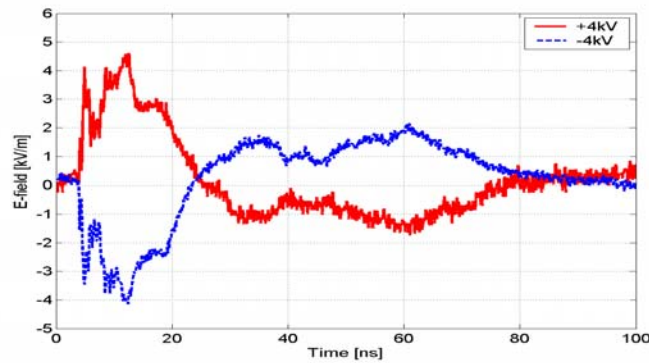
Σχήμα 6.62: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο A2 (35 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση +4kV και -4kV.

- **Σημείο A3 (50 cm)**



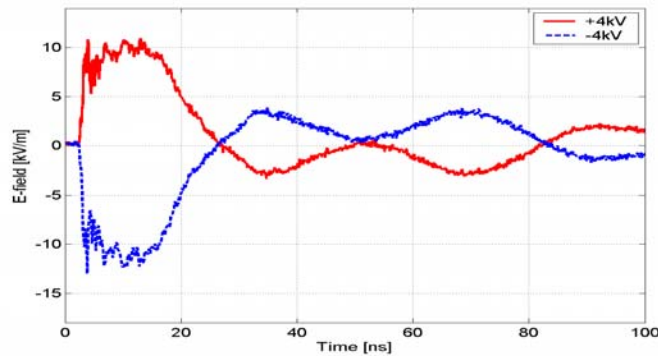
Σχήμα 6.63: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο A3 (50 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση +4kV και -4kV.

- **Σημείο A4 (65 cm)**



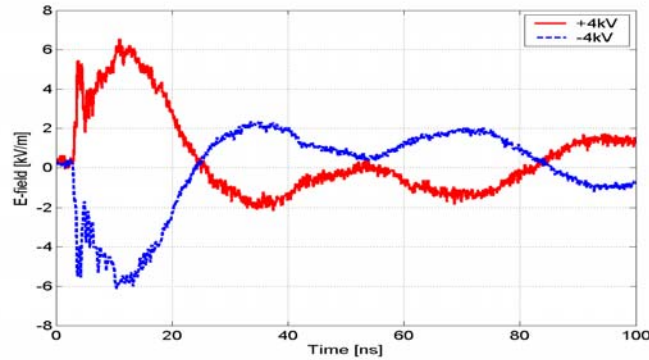
Σχήμα 6.64: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο A4 (65 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση +4kV και -4kV.

- **Σημείο C1 (20 cm)**



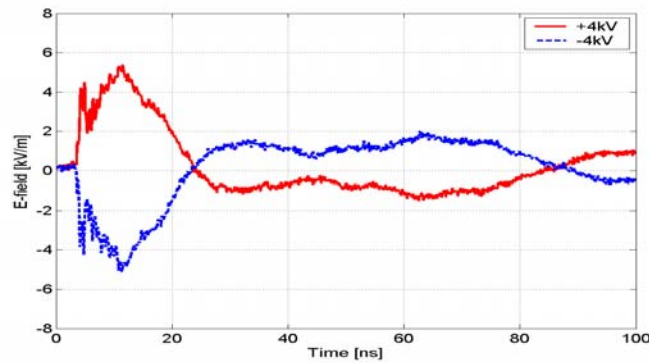
Σχήμα 6.65: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο C1 (20 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση +4kV και -4kV.

- **Σημείο C2 (35 cm)**



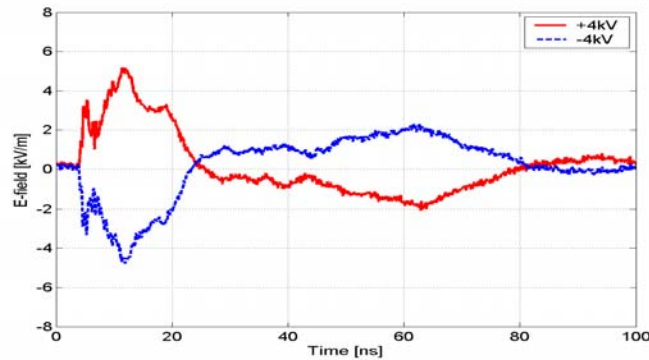
Σχήμα 6.66: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο C2 (35 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση +4kV και -4kV.

- **Σημείο C3 (50 cm)**



Σχήμα 6.67: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο C3 (50 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση +4kV και -4kV.

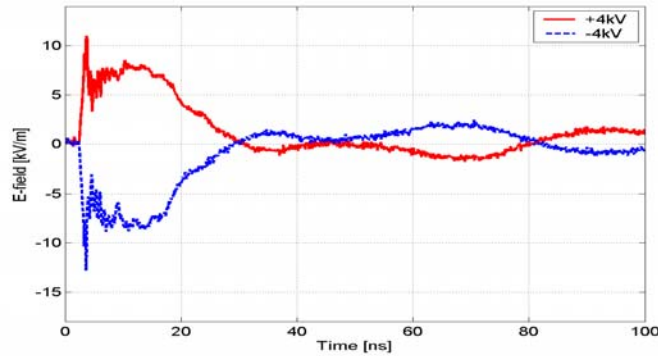
- **Σημείο C4 (65 cm)**



Σχήμα 6.68: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο C4 (65 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση +4kV και -4kV.

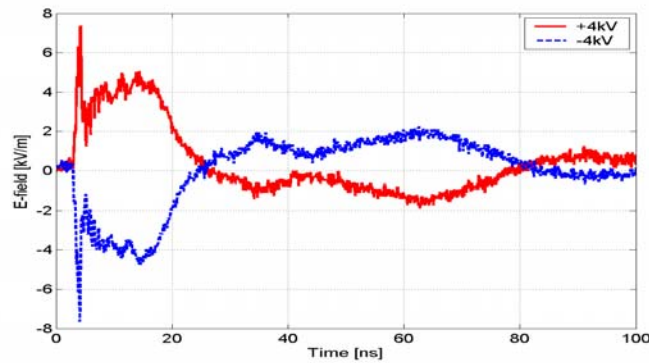


- **Σημείο D1 (20 cm)**



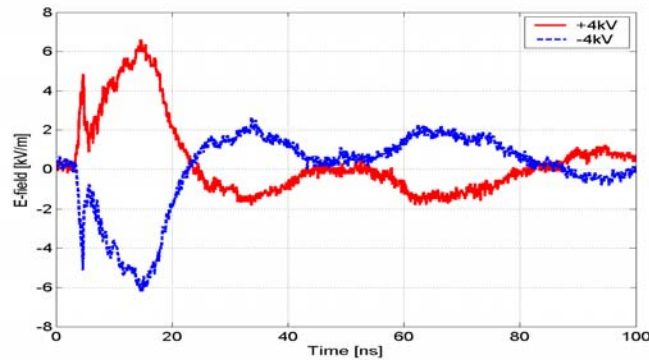
Σχήμα 6.69: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο D1 (20 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση +4kV και -4kV.

- **Σημείο D2 (35 cm)**



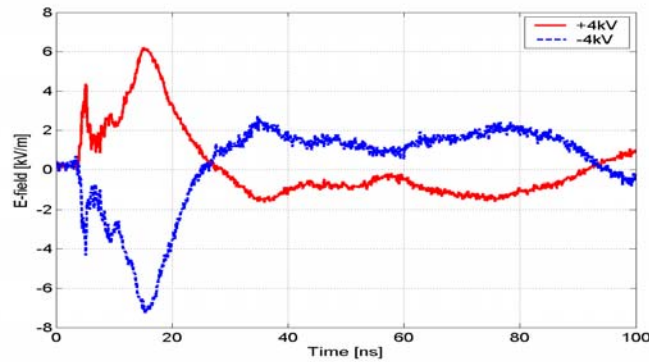
Σχήμα 6.70: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο D2 (35 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση +4kV και -4kV.

- **Σημείο D3 (50 cm)**



Σχήμα 6.71: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο D3 (50 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση +4kV και -4kV.

- **Σημείο D4 (65 cm)**

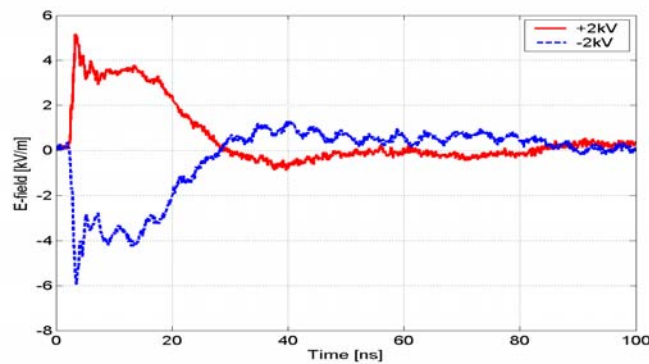


Σχήμα 6.72: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο D4 (65 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση +4kV και -4kV.

### 6.3.2 Γεννήτρια NSG-438

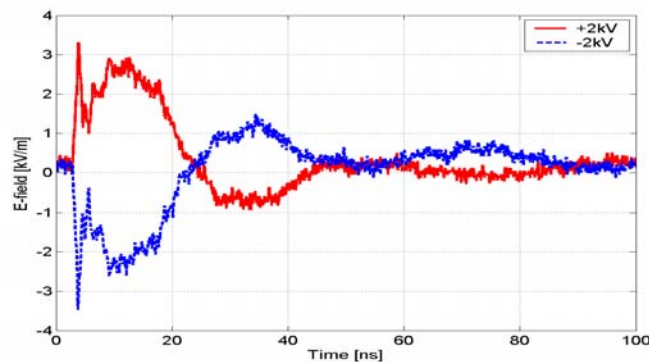
#### Για τάση φόρτισης +2kV και -2kV

- **Σημείο A1 (20 cm)**



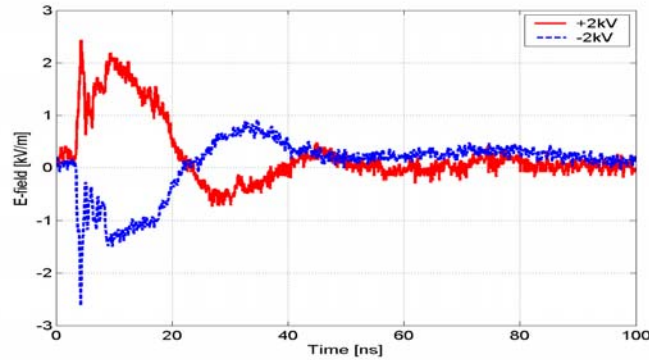
Σχήμα 6.73: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο A1 (20 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση +2kV και -2kV.

- **Σημείο A2 (35 cm)**



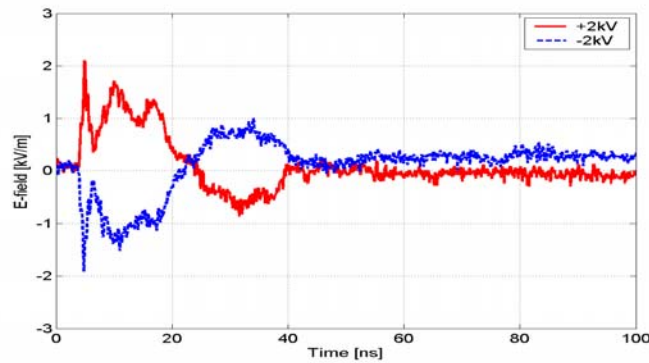
Σχήμα 6.74: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο A2 (35 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση +2kV και -2kV.

- **Σημείο A3 (50 cm)**



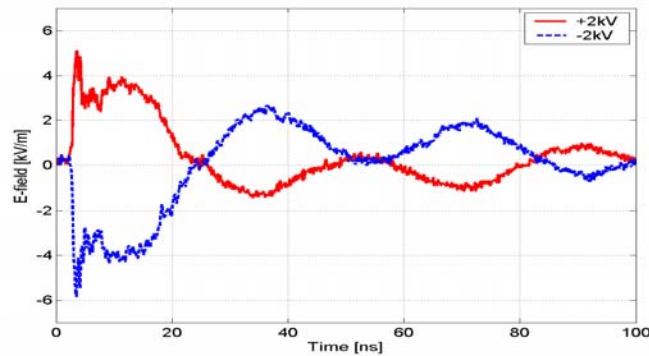
Σχήμα 6.75: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο A3 (50 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση +2kV και -2kV.

- **Σημείο A4 (65 cm)**



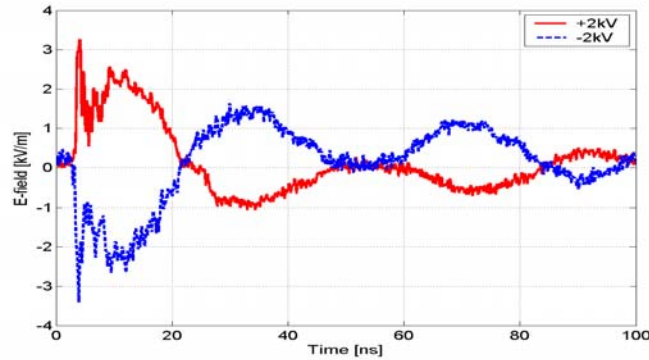
Σχήμα 6.76: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο A4 (65 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση +2kV και -2kV.

- **Σημείο C1 (20 cm)**



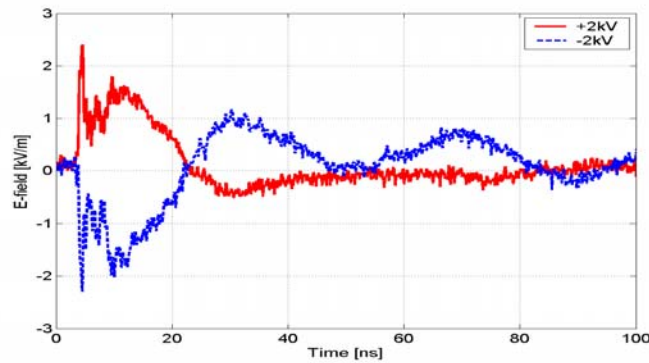
Σχήμα 6.77: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο C1 (20 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση +2kV και -2kV.

- **Σημείο C2 (35 cm)**



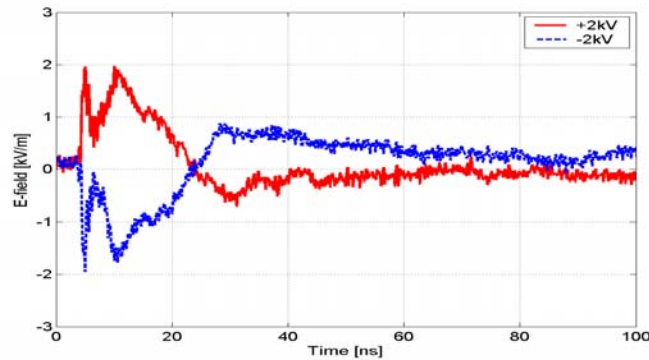
Σχήμα 6.78: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο C2 (35 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση +2kV και -2kV.

- **Σημείο C3 (50 cm)**



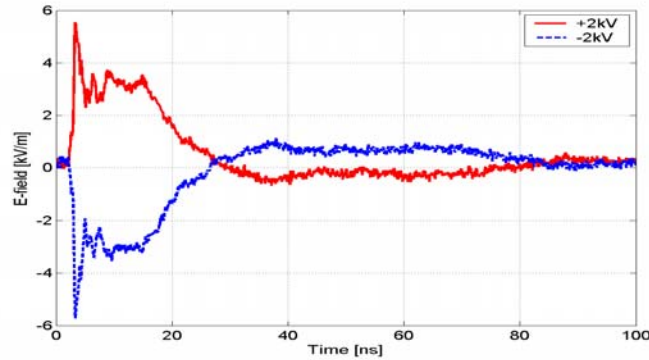
Σχήμα 6.79: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο C3 (50 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση +2kV και -2kV.

- **Σημείο C4 (65 cm)**



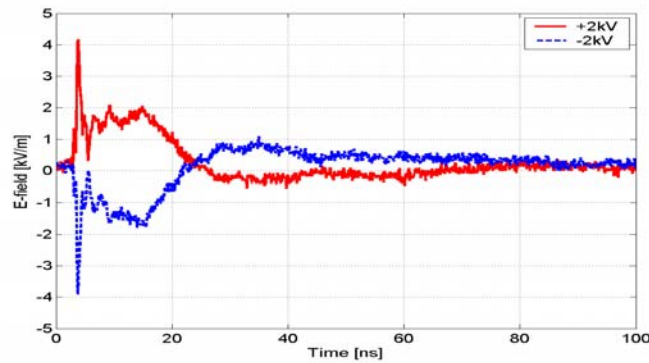
Σχήμα 6.80: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο C4 (65 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση +2kV και -2kV.

- **Σημείο D1 (20 cm)**



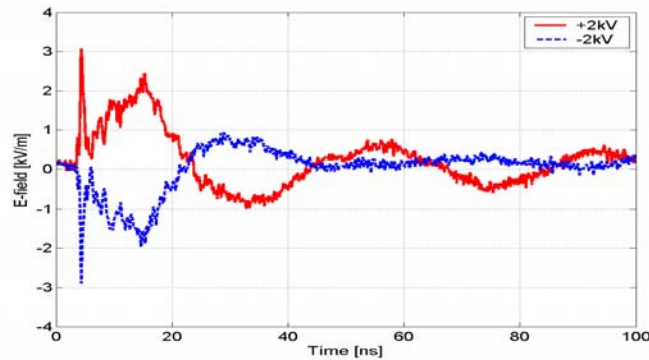
Σχήμα 6.81: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο D1 (20 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση +2kV και -2kV.

- **Σημείο D2 (35 cm)**



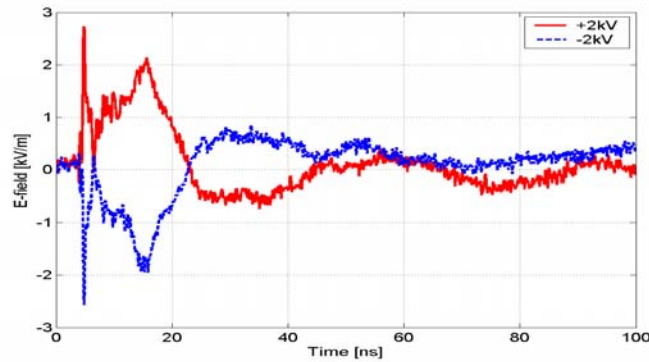
Σχήμα 6.82: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο D2 (35 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση +2kV και -2kV.

- **Σημείο D3 (50 cm)**



Σχήμα 6.83: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο D3 (50 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση +2kV και -2kV.

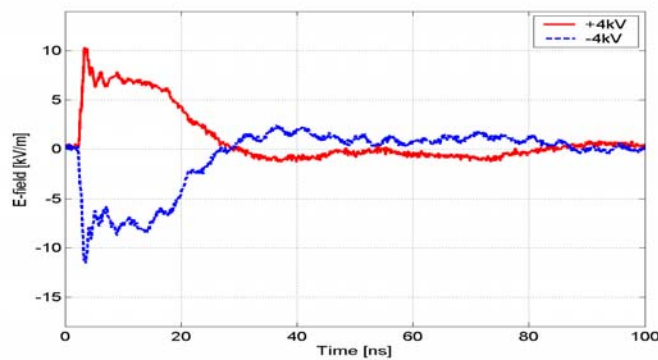
- **Σημείο D4 (65 cm)**



Σχήμα 6.84: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο D4 (65 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση +2kV και -2kV.

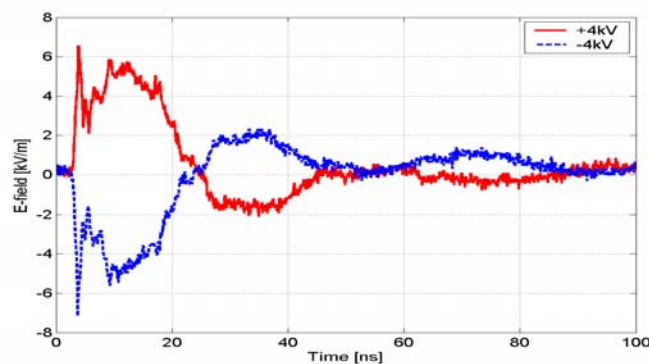
**Για τάση φόρτισης +4kV και -4kV**

- **Σημείο A1 (20 cm)**



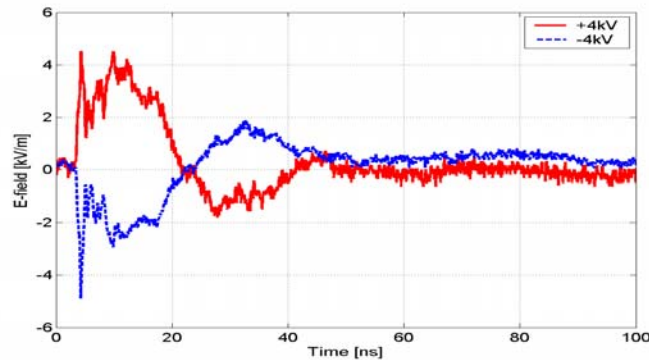
Σχήμα 6.85: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο A1 (20 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση +4kV και -4kV.

- **Σημείο A2 (35 cm)**



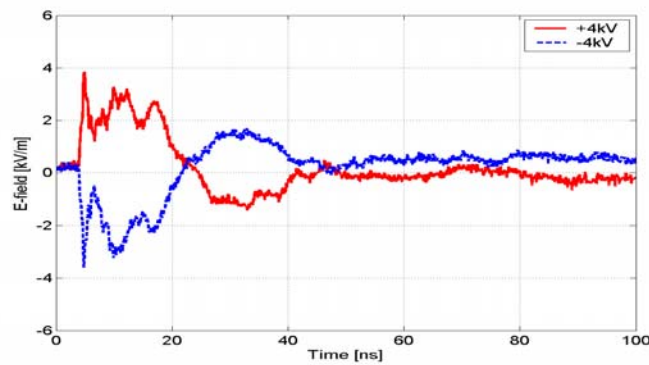
Σχήμα 6.86: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο A2 (35 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση +4kV και -4kV.

- **Σημείο A3 (50 cm)**



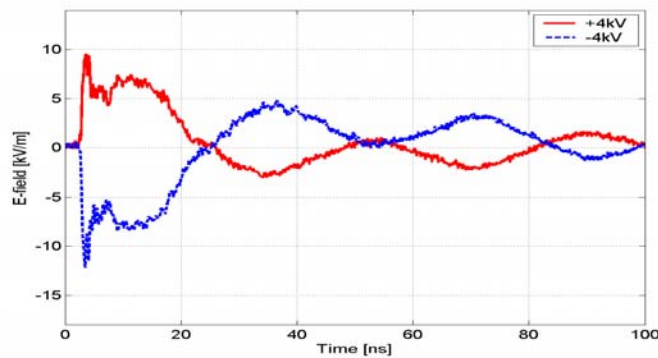
Σχήμα 6.87: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο A3 (50 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση +4kV και -4kV.

- **Σημείο A4 (65 cm)**



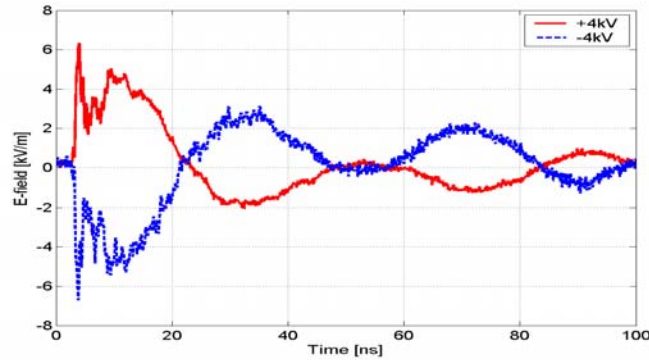
Σχήμα 6.88: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο A4 (65 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση +4kV και -4kV.

- **Σημείο C1 (20 cm)**



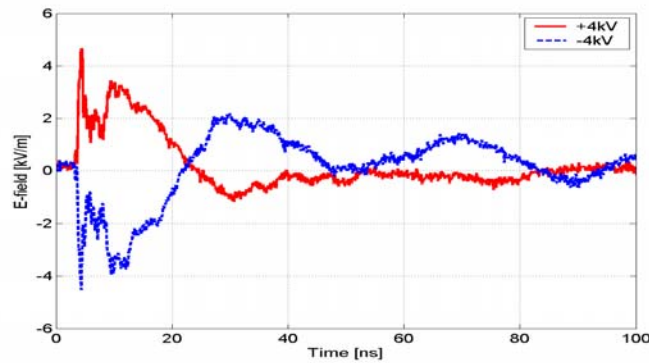
Σχήμα 6.89: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο C1 (20 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση +4kV και -4kV.

- **Σημείο C2 (35 cm)**



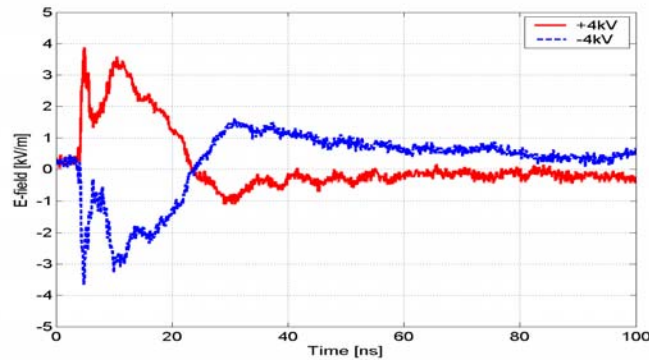
Σχήμα 6.90: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο C2 (35 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση +4kV και -4kV.

- **Σημείο C3 (50 cm)**



Σχήμα 6.91: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο C3 (50 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση +4kV και -4kV.

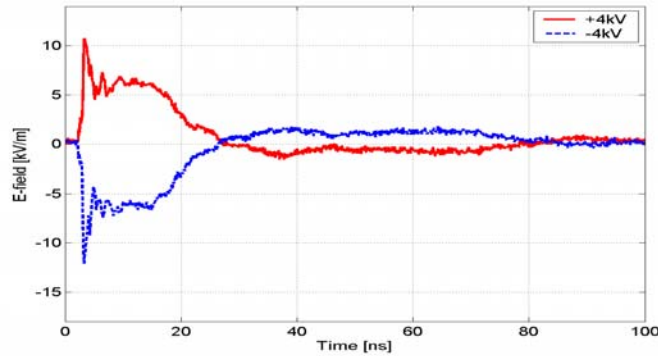
- **Σημείο C4 (65 cm)**



Σχήμα 6.92: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο C4 (65 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση +4kV και -4kV.

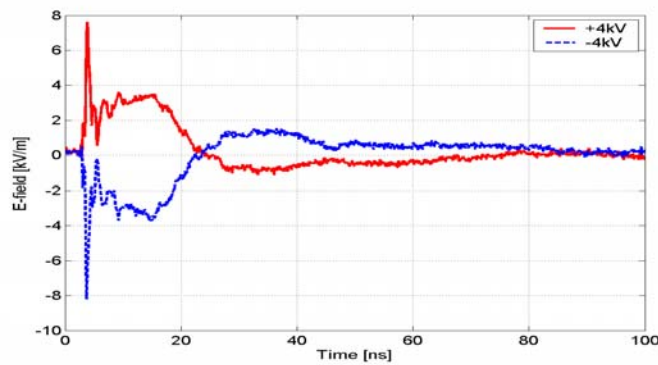


- **Σημείο D1 (20 cm)**



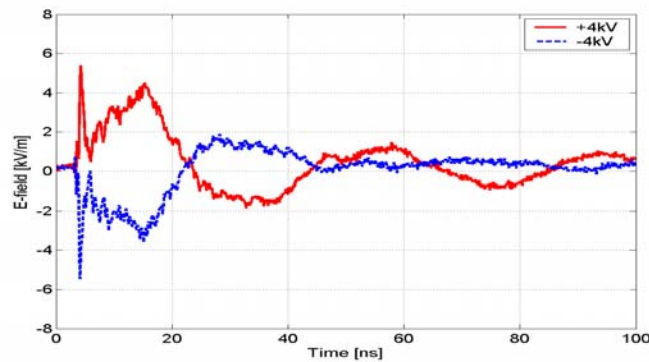
Σχήμα 6.93: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο D1 (20 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση +4kV και -4kV.

- **Σημείο D2 (35 cm)**



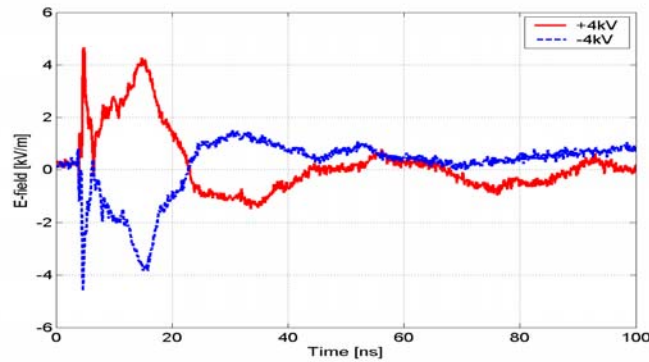
Σχήμα 6.94: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο D2 (35 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση +4kV και -4kV.

- **Σημείο D3 (50 cm)**



Σχήμα 6.95: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο D3 (50 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση +4kV και -4kV.

- **Σημείο D4 (65 cm)**



Σχήμα 6.96: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο D4 (65 cm) για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση +4kV και -4kV.

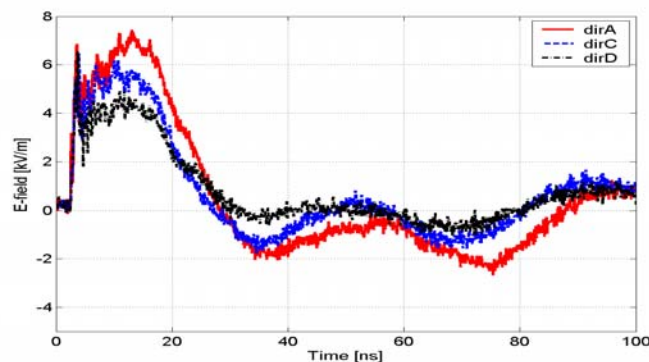
#### 6.4 Σύγκριση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου και για τις τρεις κατευθύνσεις για την ίδια γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων.

Στην παράγραφο αυτή θα παρουσιαστούν τα συγκριτικά γραφήματα της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου για κάθε σημείο παρατήρησης και για τις τρεις κατευθύνσεις και με τις δυο γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων NSG-433 και NSG-438.

##### 6.4.1 Γεννήτρια NSG-433

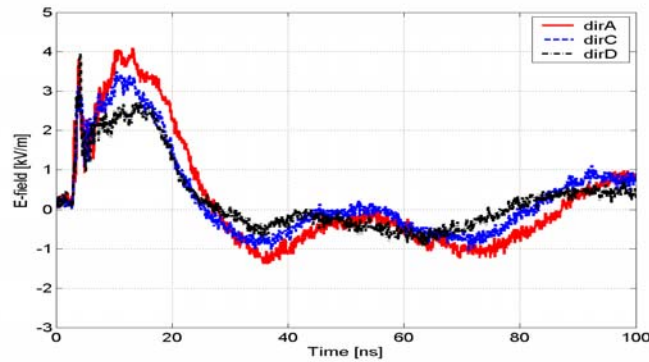
###### Για τάση φόρτισης +2kV.

- **Σημείο (20 cm)**



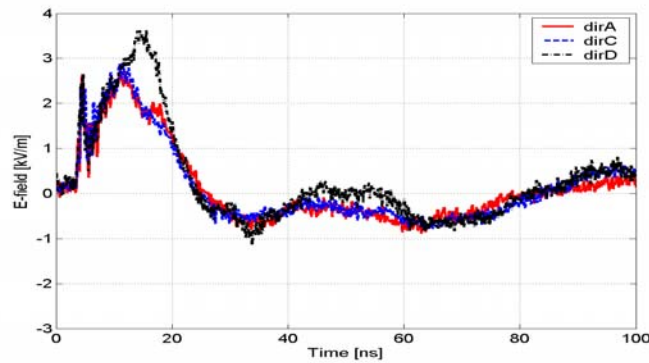
Σχήμα 6.97: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο (20 cm) για εκφορτίσεις επαφής και για τις τρεις κατευθύνσεις με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση +2kV.

- Σημείο (35 cm)



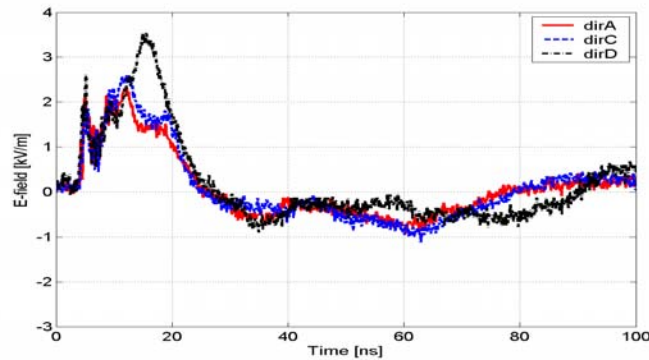
Σχήμα 6.98: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο (35 cm) για εκφορτίσεις επαφής και για τις τρεις κατευθύνσεις με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση +2kV.

- Σημείο (50 cm)

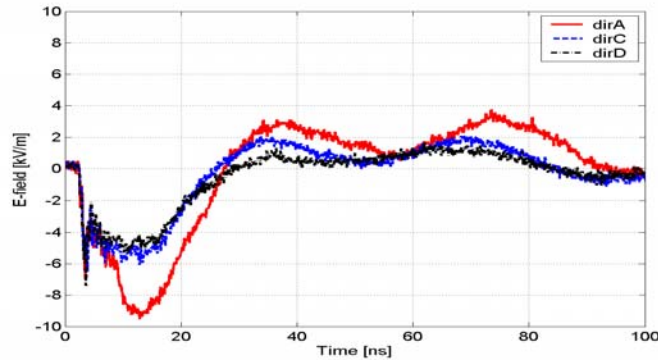


Σχήμα 6.99: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο (50 cm) για εκφορτίσεις επαφής και για τις τρεις κατευθύνσεις με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση +2kV.

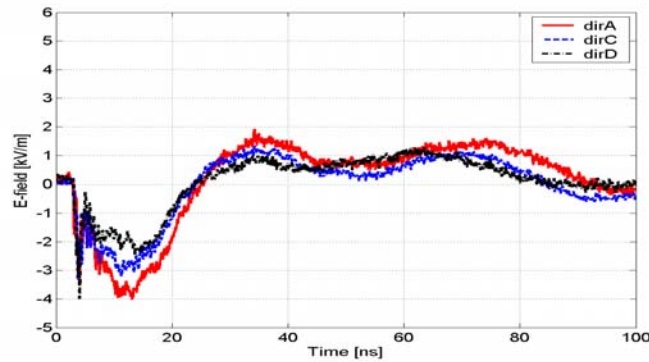
- Σημείο (65 cm)



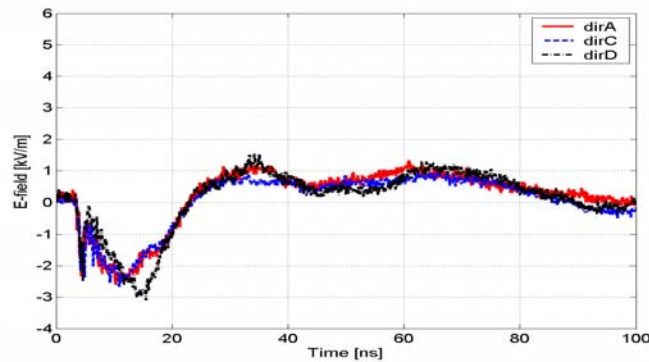
Σχήμα 6.100: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο (65 cm) για εκφορτίσεις επαφής και για τις τρεις κατευθύνσεις με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση +2kV.

**Για τάση φόρτισης -2kV.**• **Σημείο (20 cm)**

Σχήμα 6.101: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο (20 cm) για εκφορτίσεις επαφής και για τις τρεις κατευθύνσεις με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση -2kV.

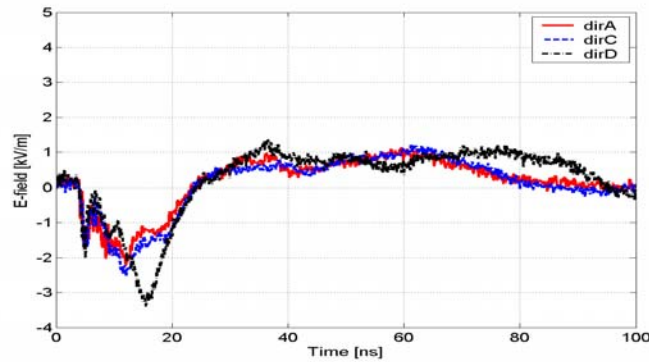
• **Σημείο (35 cm)**

Σχήμα 6.102: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο (35 cm) για εκφορτίσεις επαφής και για τις τρεις κατευθύνσεις με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση -2kV.

• **Σημείο (50 cm)**

Σχήμα 6.103: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο (50 cm) για εκφορτίσεις επαφής και για τις τρεις κατευθύνσεις με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση -2kV.

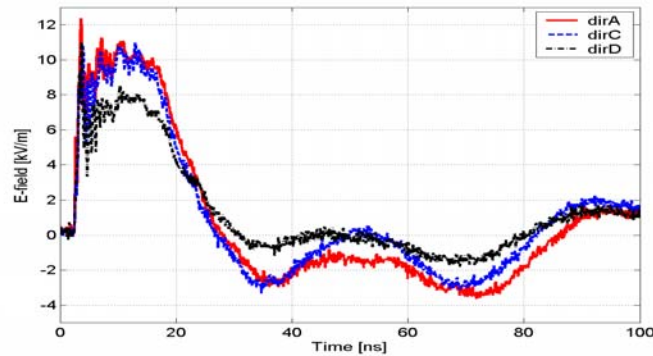
- **Σημείο (65 cm)**



Σχήμα 6.104: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο (65 cm) για εκφορτίσεις επαφής και για τις τρεις κατευθύνσεις με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση  $-2kV$ .

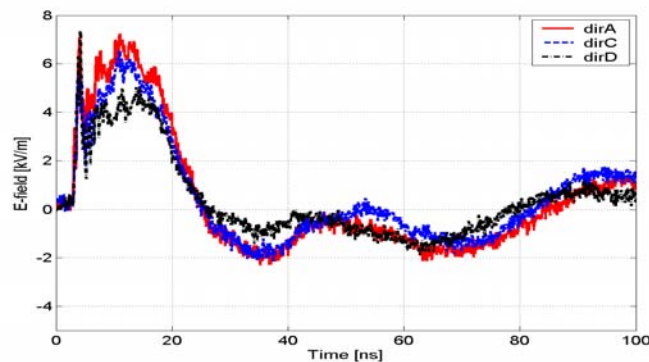
**Για τάση φόρτισης +4kV.**

- **Σημείο (20 cm)**



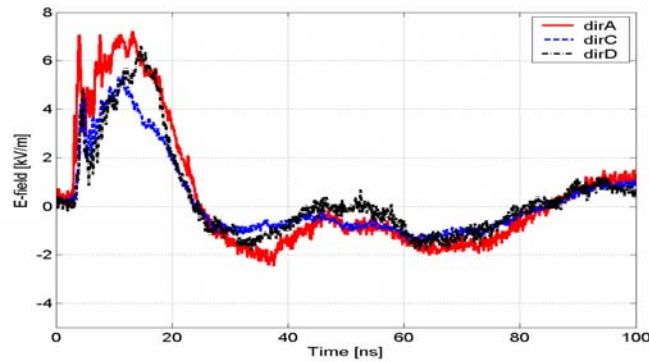
Σχήμα 6.105: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο (20 cm) για εκφορτίσεις επαφής και για τις τρεις κατευθύνσεις με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση  $42kV$ .

- **Σημείο (35 cm)**



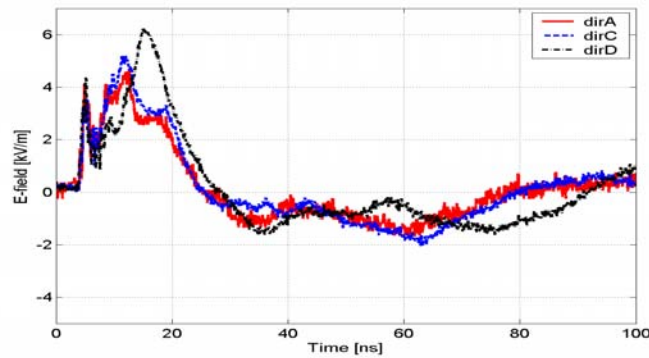
Σχήμα 6.106: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο (35 cm) για εκφορτίσεις επαφής και για τις τρεις κατευθύνσεις με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση  $+4kV$ .

- Σημείο (50 cm)



Σχήμα 6.107: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο (50 cm) για εκφορτίσεις επαφής και για τις τρεις κατευθύνσεις με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση +4kV.

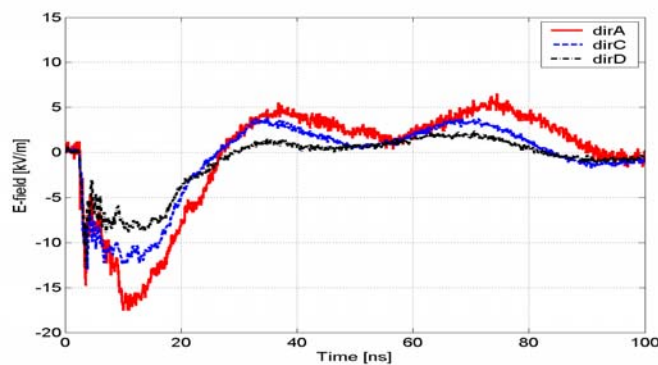
- Σημείο (65 cm)



Σχήμα 6.108: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο (65 cm) για εκφορτίσεις επαφής και για τις τρεις κατευθύνσεις με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση +4kV.

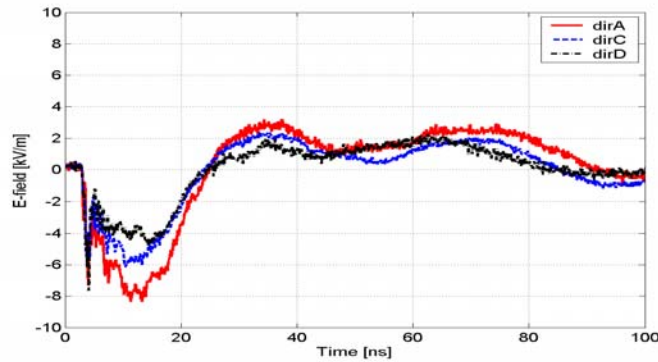
Για τάση φόρτισης -4kV.

- Σημείο (20 cm)



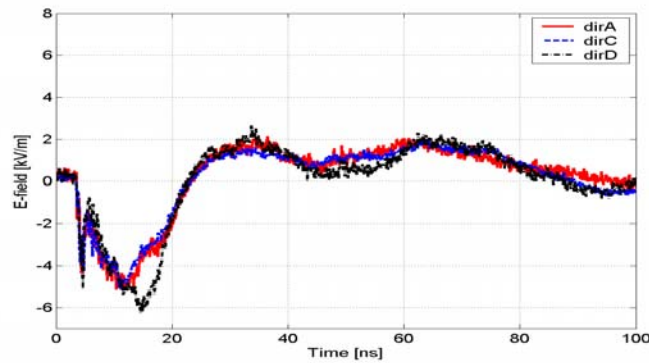
Σχήμα 6.109: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο (20 cm) για εκφορτίσεις επαφής και για τις τρεις κατευθύνσεις με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση -4kV.

- **Σημείο (35 cm)**



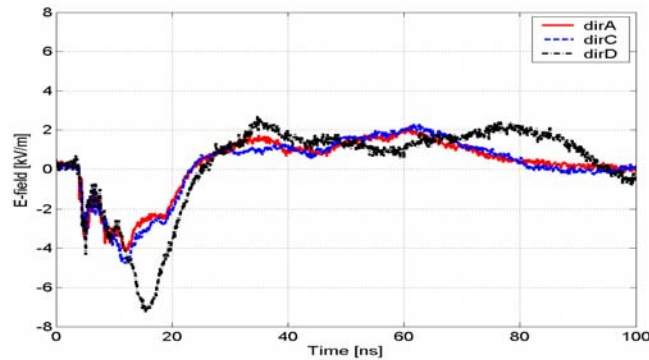
Σχήμα 6.110: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο (35 cm) για εκφορτίσεις επαφής και για τις τρεις κατευθύνσεις με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση  $-4kV$ .

- **Σημείο (50 cm)**



Σχήμα 6.111: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο (50 cm) για εκφορτίσεις επαφής και για τις τρεις κατευθύνσεις με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση  $-4kV$ .

- **Σημείο (65 cm)**

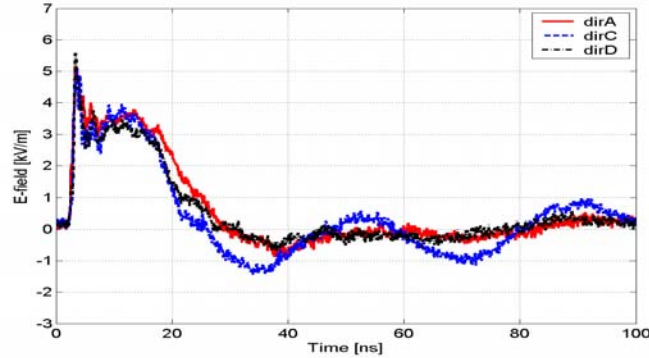


Σχήμα 6.112: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο (65 cm) για εκφορτίσεις επαφής και για τις τρεις κατευθύνσεις με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση  $-4kV$ .

## 6.4.2 Γεννήτρια NSG-438

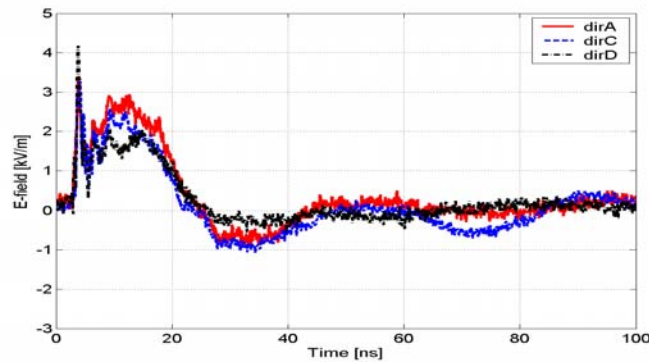
### Για τάση φόρτισης +2kV.

- Σημείο (20 cm)



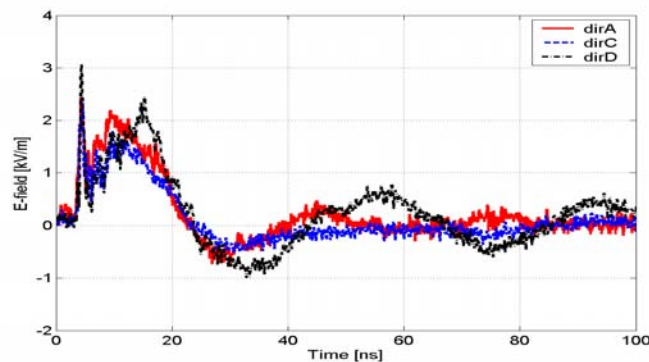
Σχήμα 6.113: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο (20 cm) για εκφορτίσεις επαφής και για τις τρεις κατευθύνσεις με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση +2kV.

- Σημείο (35 cm)



Σχήμα 6.114: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο (35 cm) για εκφορτίσεις επαφής και για τις τρεις κατευθύνσεις με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση +2kV.

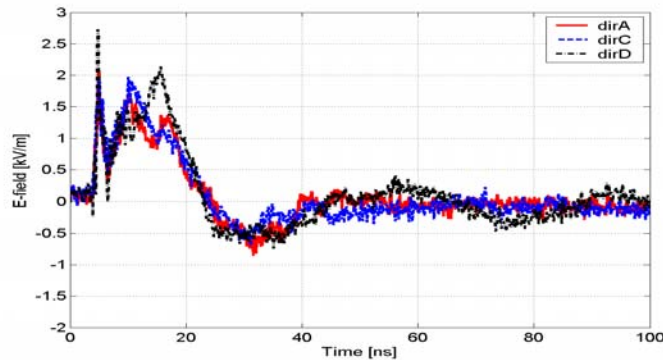
- Σημείο (50 cm)



Σχήμα 6.115: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο (50 cm) για εκφορτίσεις επαφής και για τις τρεις κατευθύνσεις με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση +2kV.



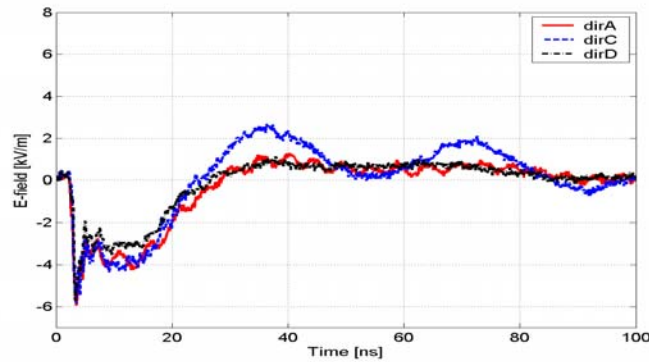
- **Σημείο (65 cm)**



Σχήμα 6.116: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο (65 cm) για εκφορτίσεις επαφής και για τις τρεις κατευθύνσεις με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση +2kV.

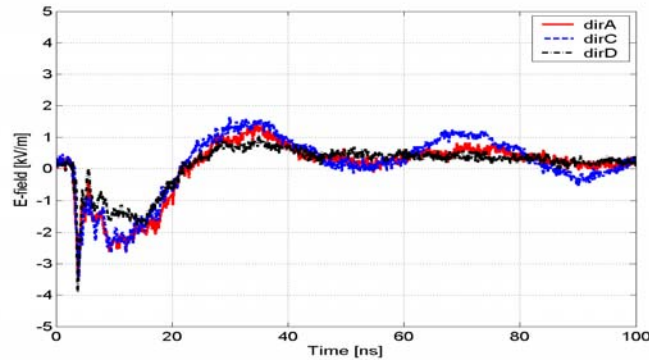
**Για τάση φόρτισης -2kV.**

- **Σημείο (20 cm)**



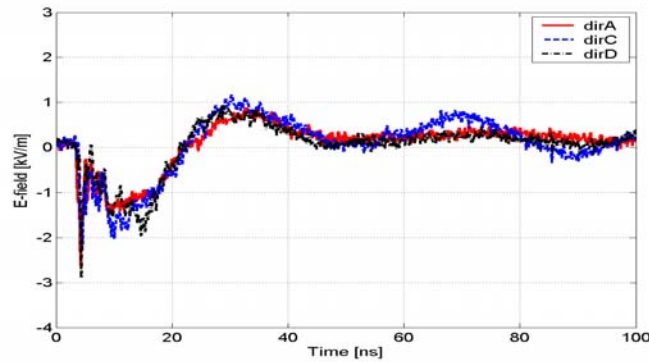
Σχήμα 6.117: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο (20 cm) για εκφορτίσεις επαφής και για τις τρεις κατευθύνσεις με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση -2kV.

- **Σημείο (35 cm)**



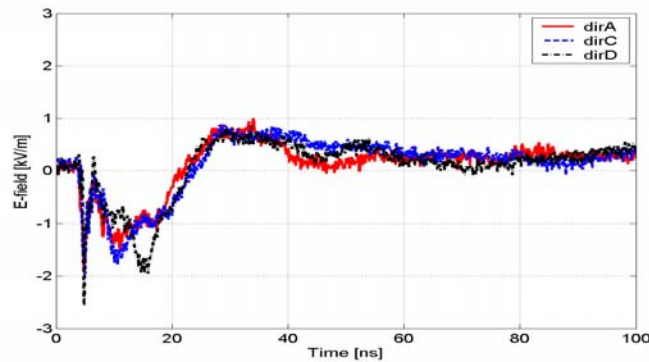
Σχήμα 6.118: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο (35 cm) για εκφορτίσεις επαφής και για τις τρεις κατευθύνσεις με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση -2kV.

- Σημείο (50 cm)



Σχήμα 6.119: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο (50 cm) για εκφορτίσεις επαφής και για τις τρεις κατευθύνσεις με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση  $-2kV$ .

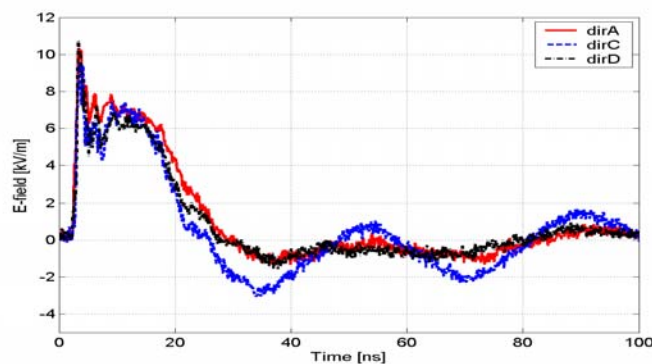
- Σημείο (65 cm)



Σχήμα 6.120: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο (65 cm) για εκφορτίσεις επαφής και για τις τρεις κατευθύνσεις με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση  $-2kV$ .

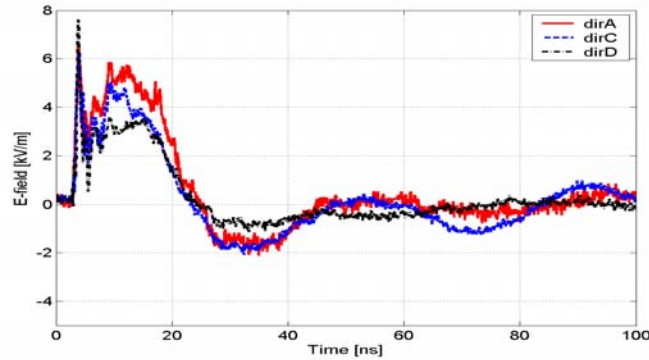
Για τάση φόρτισης  $+4kV$ .

- Σημείο (20 cm)



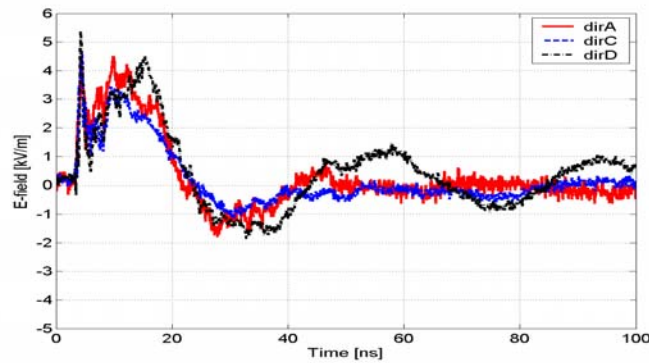
Σχήμα 6.121: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο (20 cm) για εκφορτίσεις επαφής και για τις τρεις κατευθύνσεις με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση  $+4kV$ .

- Σημείο (35 cm)



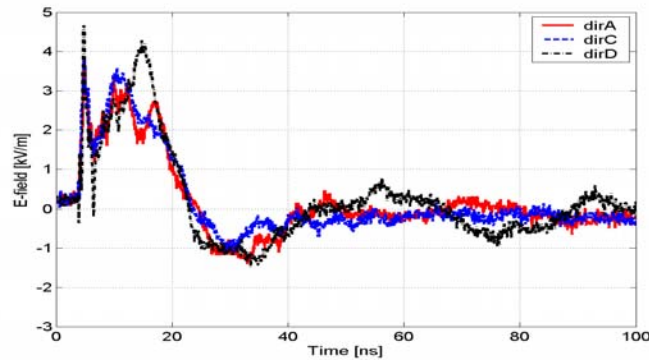
Σχήμα 6.122: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο (35 cm) για εκφορτίσεις επαφής και για τις τρεις κατευθύνσεις με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση +4kV.

- Σημείο (50 cm)

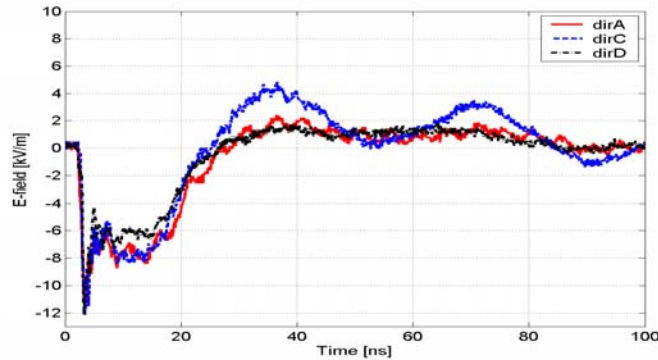


Σχήμα 6.123: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο (50 cm) για εκφορτίσεις επαφής και για τις τρεις κατευθύνσεις με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση +4kV.

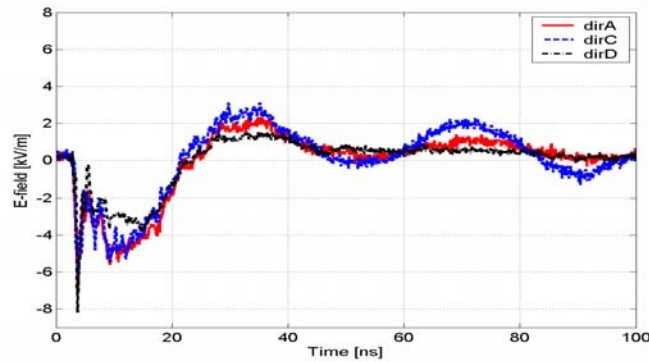
- Σημείο (65 cm)



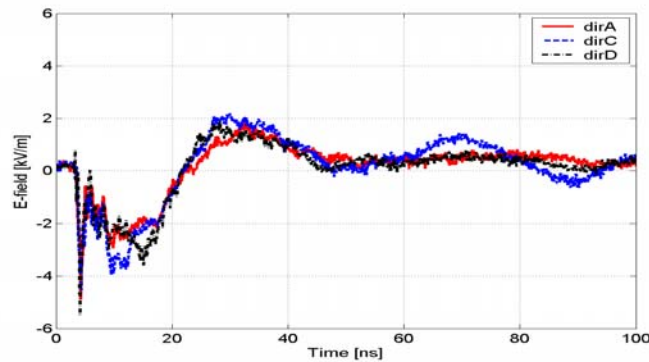
Σχήμα 6.124: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο (65 cm) για εκφορτίσεις επαφής και για τις τρεις κατευθύνσεις με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση +4kV.

**Για τάση φόρτισης -4kV.**• **Σημείο (20 cm)**

Σχήμα 6.125: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο (20 cm) για εκφορτίσεις επαφής και για τις τρεις κατευθύνσεις με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση -4kV.

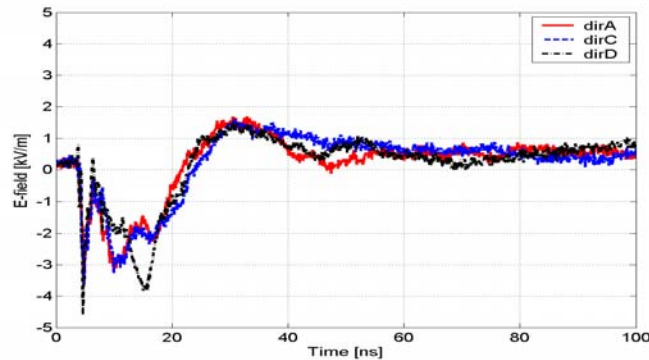
• **Σημείο (35 cm)**

Σχήμα 6.126: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο (35 cm) για εκφορτίσεις επαφής και για τις τρεις κατευθύνσεις με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση -4kV.

• **Σημείο (50 cm)**

Σχήμα 6.127: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο (50 cm) για εκφορτίσεις επαφής και για τις τρεις κατευθύνσεις με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση -4kV.

- **Σημείο (65 cm)**

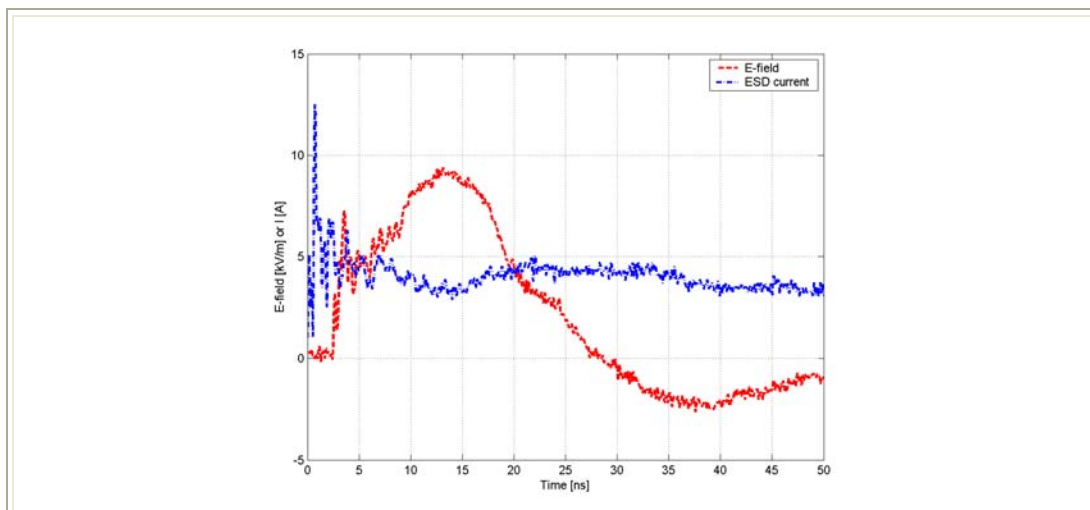


Σχήμα 6.128: Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει του χρόνου στο σημείο (65 cm) για εκφορτίσεις επαφής και για τις τρεις κατευθύνσεις με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση  $-4kV$ .

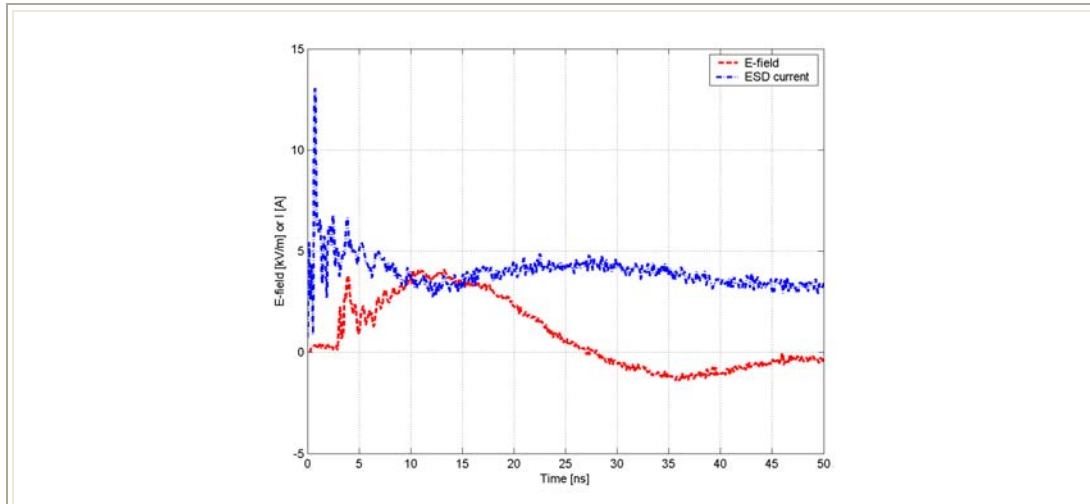
## 6.5 Σύγκριση ηλεκτρικού πεδίου και ρεύματος εκφόρτισης

Παρακάτω παρατίθενται ενδεικτικά γραφήματα όπου αντιπαραβάλλονται η ένταση  $E$  του ηλεκτρικού πεδίου και το ρεύμα εκφόρτισης από τη γεννήτρια ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων. Οι συγκρίσεις αφορούν την Κατεύθυνση A, αποστάσεις 20 cm και 35 cm του αισθητήρα από το σημείο εκφόρτισης και για τις δύο γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, Schaffner NSG-433 και Schaffner NSG-438.

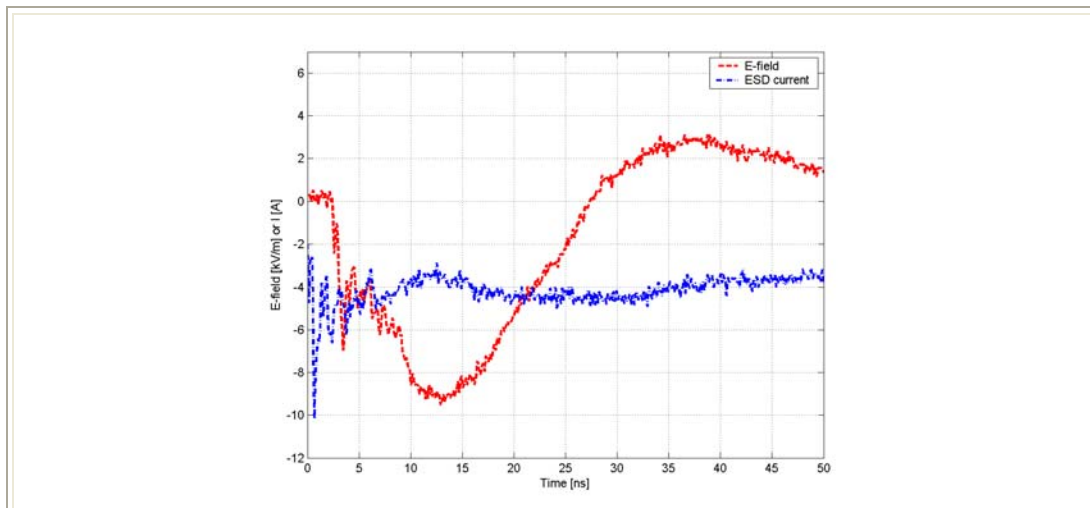
### 6.5.1 Γεννήτρια NSG-433



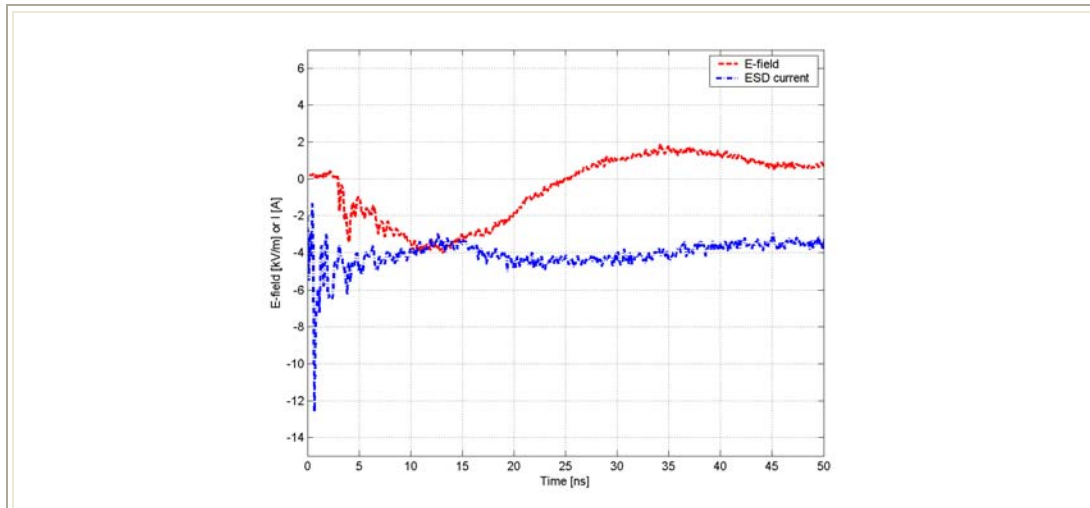
Σχήμα 6.129: Η ένταση  $E$  του ηλεκτρικού πεδίου και το ρεύμα εκφόρτισης συναρτήσει του χρόνου στην κατεύθυνση A, σε απόσταση 20 cm και για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση  $+2 kV$ .



Σχήμα 6.130: Η ένταση  $E$  του ηλεκτρικού πεδίου και το ρεύμα εκφόρτισης συναρτήσει του χρόνου στην κατεύθυνση  $A$ , σε απόσταση 35 cm και για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση +2 kV.

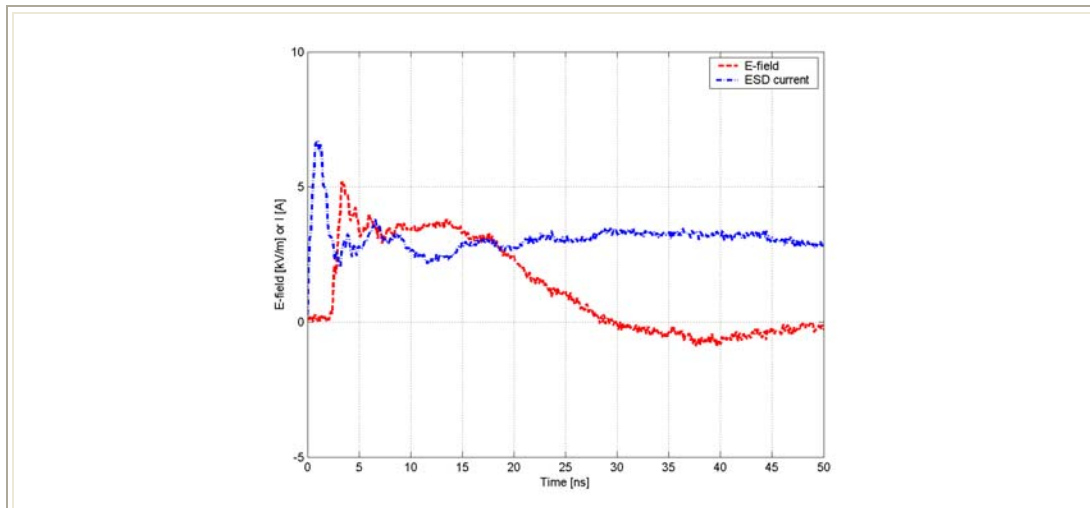


Σχήμα 6.131: Η ένταση  $E$  του ηλεκτρικού πεδίου και το ρεύμα εκφόρτισης συναρτήσει του χρόνου στην κατεύθυνση  $A$ , σε απόσταση 20 cm και για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση -2 kV.

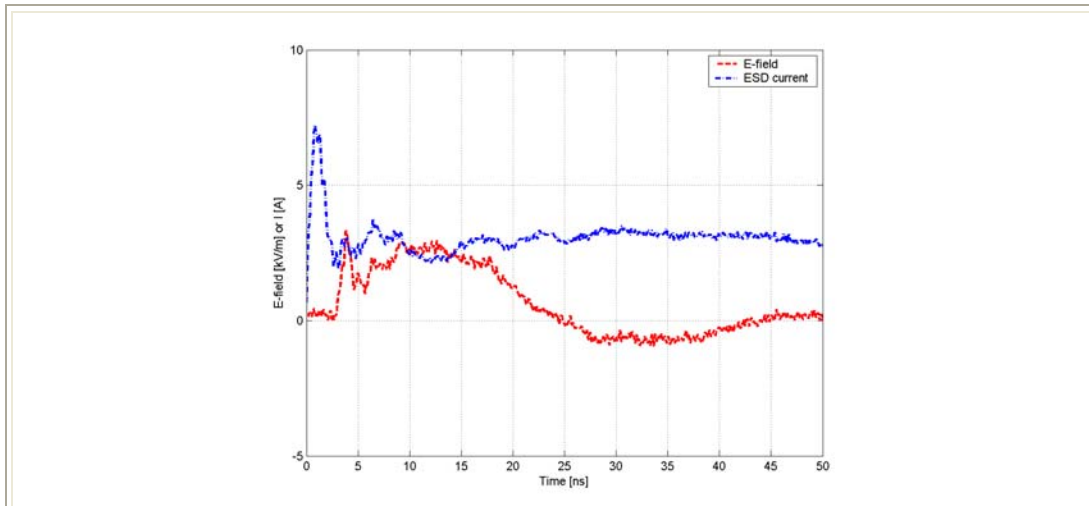


Σχήμα 6.132: Η ένταση  $E$  του ηλεκτρικού πεδίου και το ρεύμα εκφόρτισης συναρτήσει του χρόνου στην κατεύθυνση  $A$ , σε απόσταση 35 cm και για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση -2 kV.

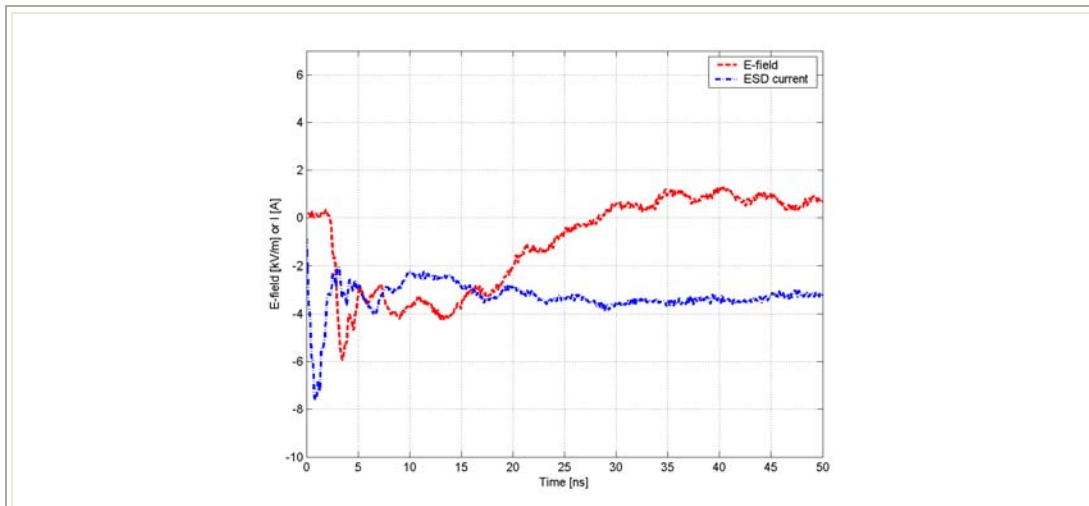
### 6.5.2 Γεννήτρια NSG-438



Σχήμα 6.133: Η ένταση  $E$  του ηλεκτρικού πεδίου και το ρεύμα εκφόρτισης συναρτήσει του χρόνου στην κατεύθυνση  $A$ , σε απόσταση 20 cm και για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση +2 kV.

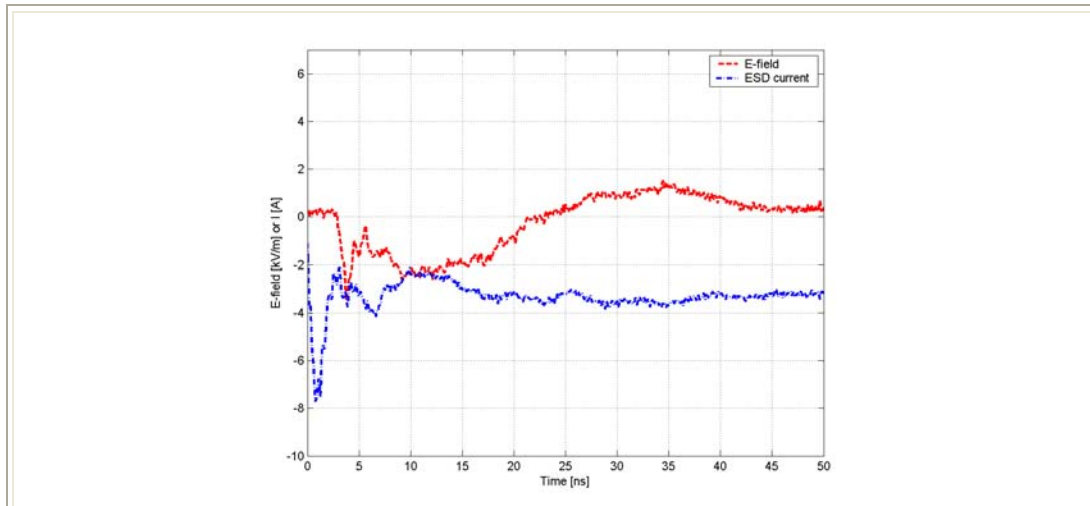


Σχήμα 6.134: Η ένταση  $E$  του ηλεκτρικού πεδίου και το ρεύμα εκφόρτισης συναρτήσει του χρόνου στην κατεύθυνση  $A$ , σε απόσταση 35 cm και για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση +2 kV.



Σχήμα 6.135: Η ένταση  $E$  του ηλεκτρικού πεδίου και το ρεύμα εκφόρτισης συναρτήσει του χρόνου στην κατεύθυνση  $A$ , σε απόσταση 20 cm και για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση -2 kV.



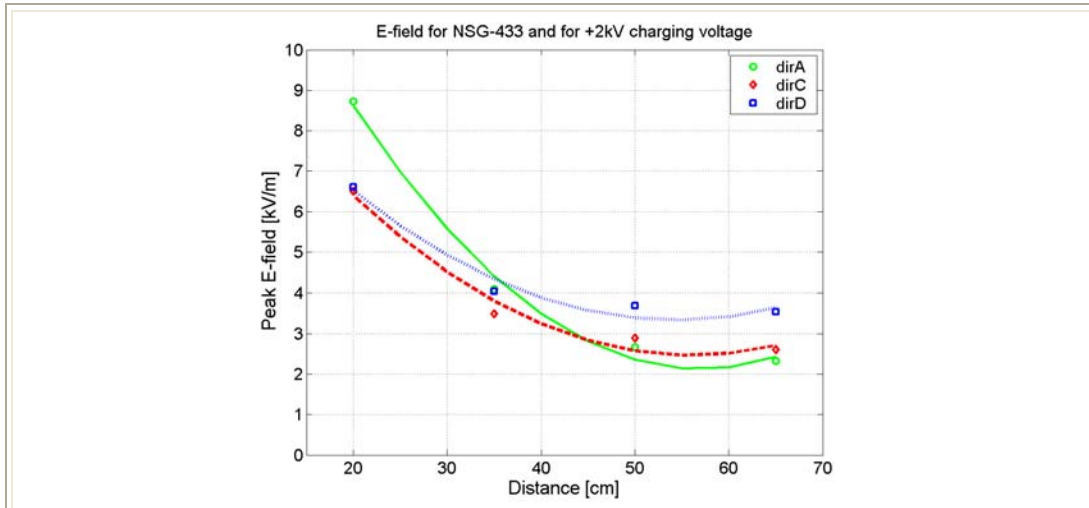


Σχήμα 6.136: Η ένταση  $E$  του ηλεκτρικού πεδίου και το ρεύμα εκφόρτισης συναρτήσει του χρόνου στην κατεύθυνση  $A$ , σε απόσταση 20 cm και για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση -2 kV.

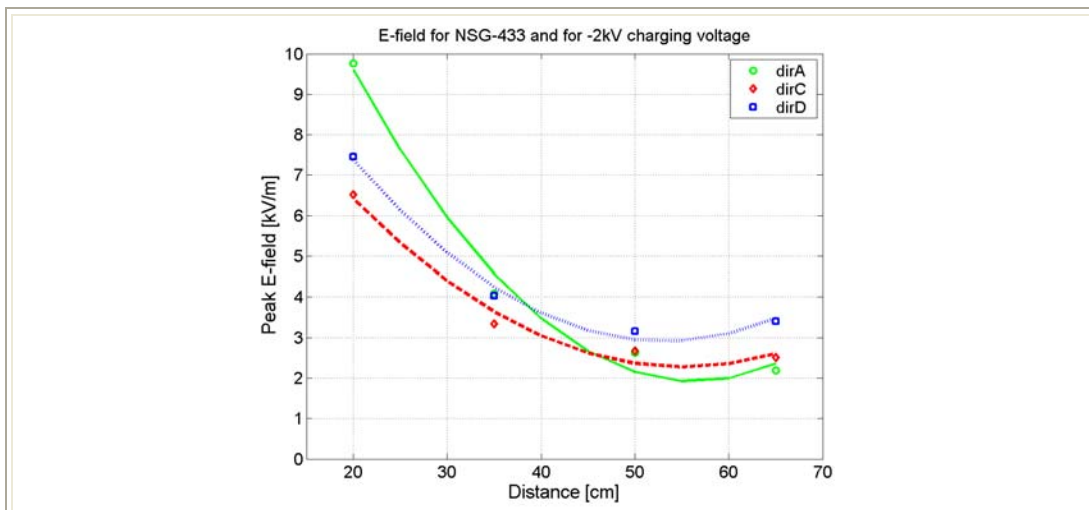
### 6.6 Μέγιστες τιμές ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει της απόστασης για εκφορτίσεις επαφής υπό τάσεις $\pm 2$ kV και $\pm 4$ kV με τις γεννήτριες NSG-433 και NSG-438.

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται τα γραφήματα των μέγιστων τιμών της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου συναρτήσει της απόστασης και ως προς όλες τις κατευθύνσεις για εκφορτίσεις επαφής υπό τάσεις  $\pm 2$  kV και  $\pm 4$  kV με τις γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων NSG-433 και NSG-438. Όπως εύκολα μπορεί να παρατηρηθεί το πλάτος της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου όσον αφορά την απόλυτη τιμή του μειώνεται όσο απομακρυνόμαστε από το σημείο εκφόρτισης.

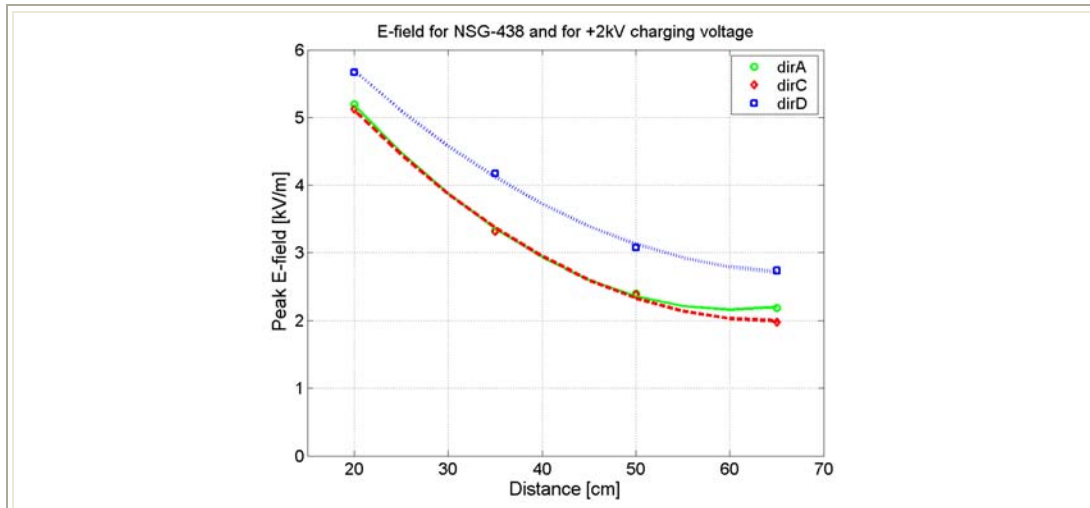
### 6.6.1 Συγκρίσεις για τάσεις φόρτισης $\pm 2$ kV



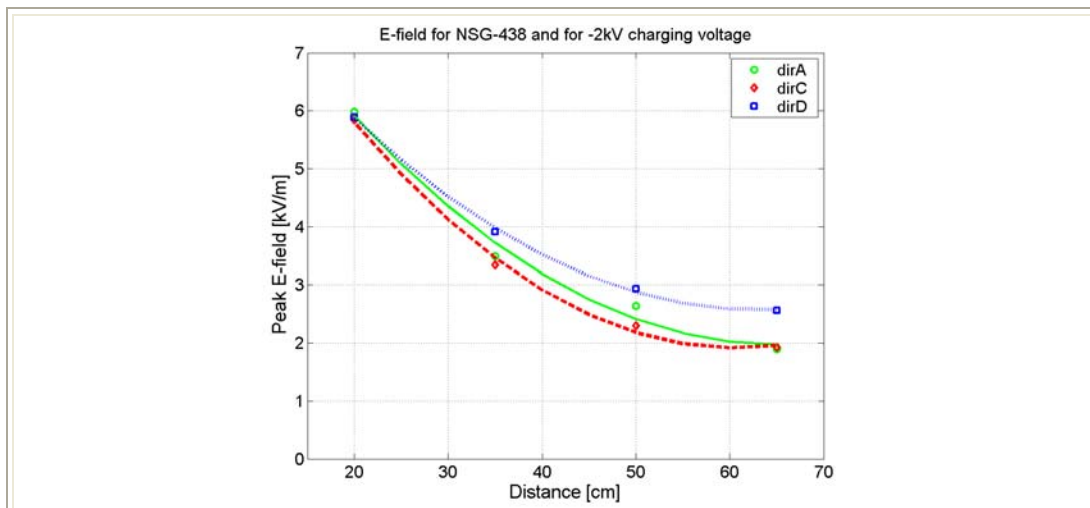
Σχήμα 6.137: Οι μέγιστες τιμές της έντασης  $E$  του ηλεκτρικού πεδίου συναρτήσει του χρόνου στις τρεις κατευθύνσεις και σε όλες τις αποστάσεις για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση  $+2$  kV.



Σχήμα 6.138: Οι μέγιστες τιμές της έντασης  $E$  του ηλεκτρικού πεδίου συναρτήσει του χρόνου στις τρεις κατευθύνσεις και σε όλες τις αποστάσεις για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση  $-2$  kV.

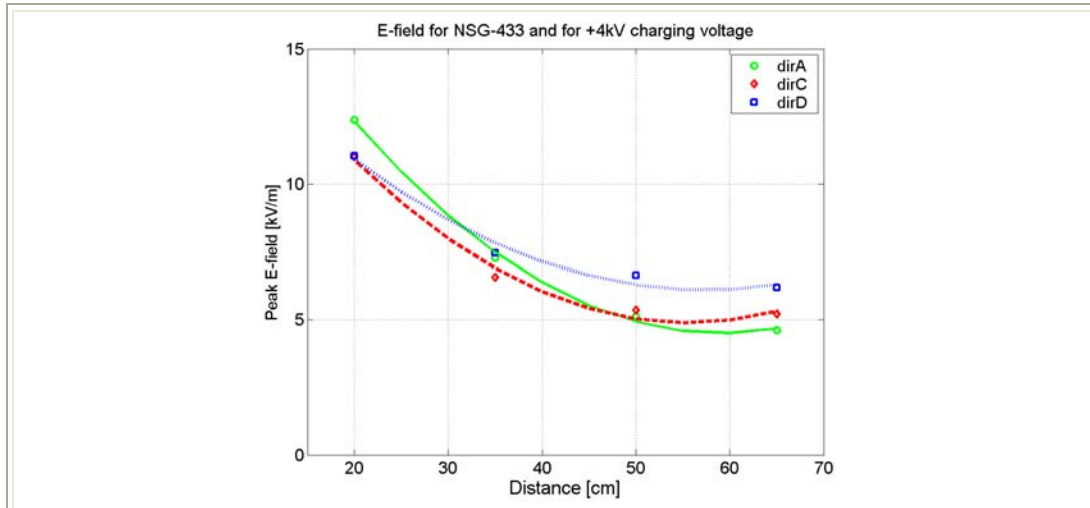


Σχήμα 6.139: Οι μέγιστες τιμές της έντασης  $E$  του ηλεκτρικού πεδίου συναρτήσει του χρόνου στις τρεις κατευθύνσεις και σε όλες τις αποστάσεις για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση +2kV.

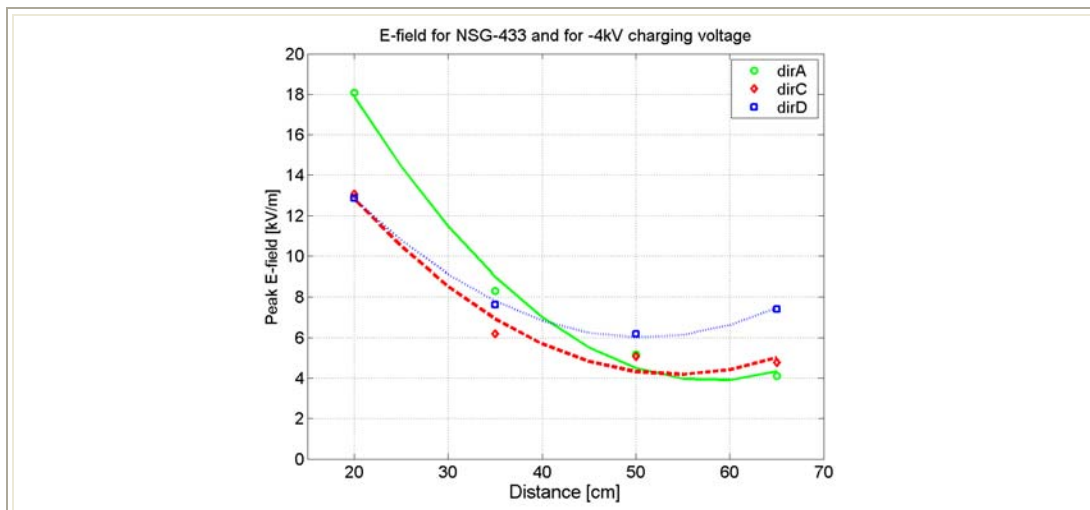


Σχήμα 6.140: Οι μέγιστες τιμές της έντασης  $E$  του ηλεκτρικού πεδίου συναρτήσει του χρόνου στις τρεις κατευθύνσεις και σε όλες τις αποστάσεις για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση -2kV.

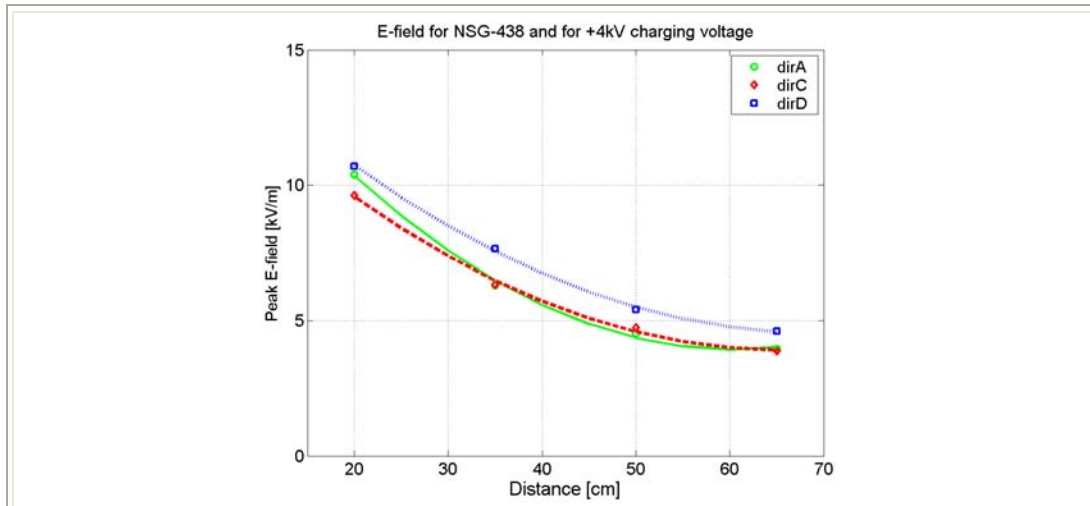
### 6.6.2 Συγκρίσεις για τάσεις φόρτισης $\pm 4$ kV



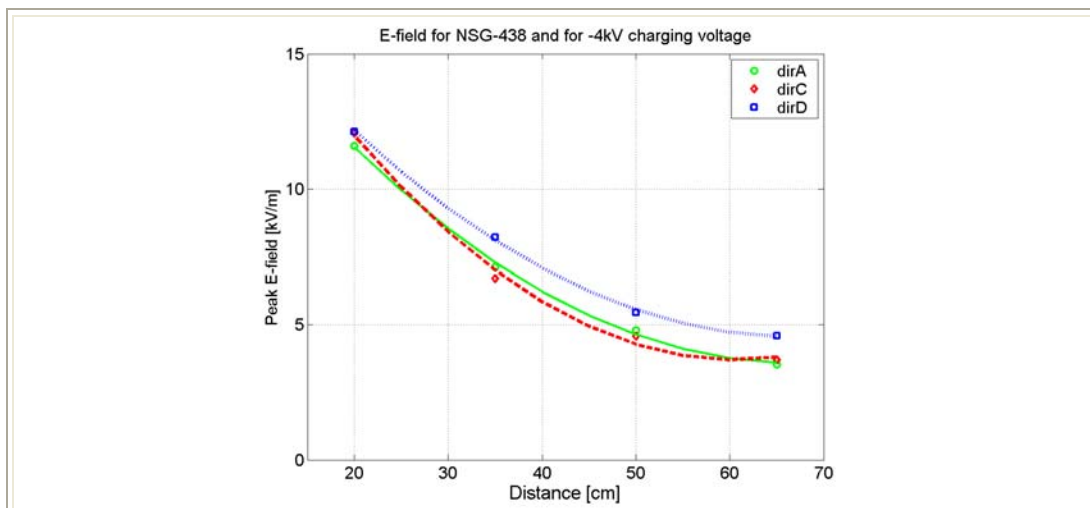
Σχήμα 6.141: Οι μέγιστες τιμές της έντασης  $E$  του ηλεκτρικού πεδίου συναρτήσει του χρόνου στις τρεις κατευθύνσεις και σε όλες τις αποστάσεις για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση +4kV.



Σχήμα 6.142: Οι μέγιστες τιμές της έντασης  $E$  του ηλεκτρικού πεδίου συναρτήσει του χρόνου στις τρεις κατευθύνσεις και σε όλες τις αποστάσεις για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-433 υπό τάση -4 kV.



Σχήμα 6.143: Οι μέγιστες τιμές της έντασης  $E$  του ηλεκτρικού πεδίου συναρτήσει του χρόνου στις τρεις κατευθύνσεις και σε όλες τις αποστάσεις για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση +4kV.

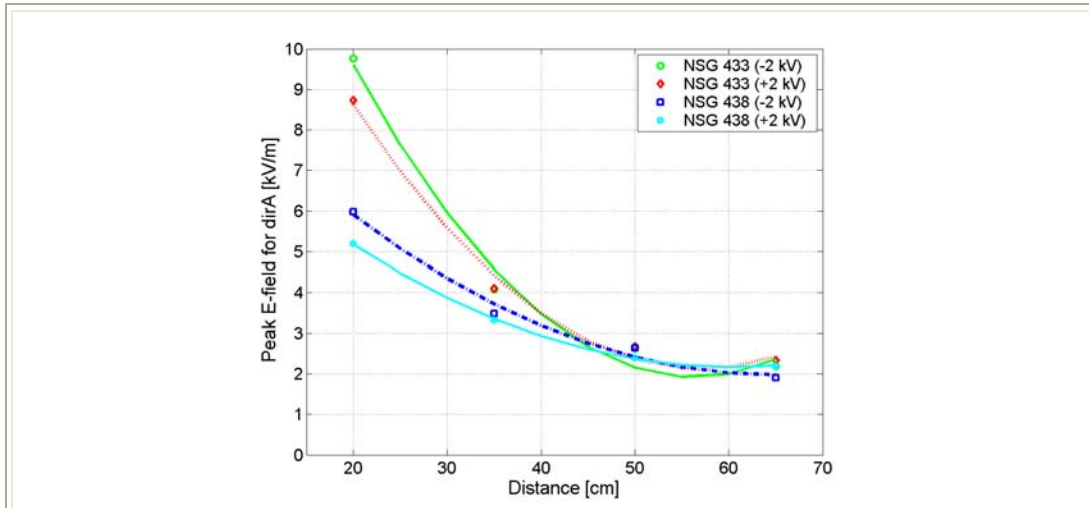


Σχήμα 6.144: Οι μέγιστες τιμές της έντασης  $E$  του ηλεκτρικού πεδίου συναρτήσει του χρόνου στις τρεις κατευθύνσεις και σε όλες τις αποστάσεις για εκφορτίσεις επαφής με τη γεννήτρια NSG-438 υπό τάση -4 kV.

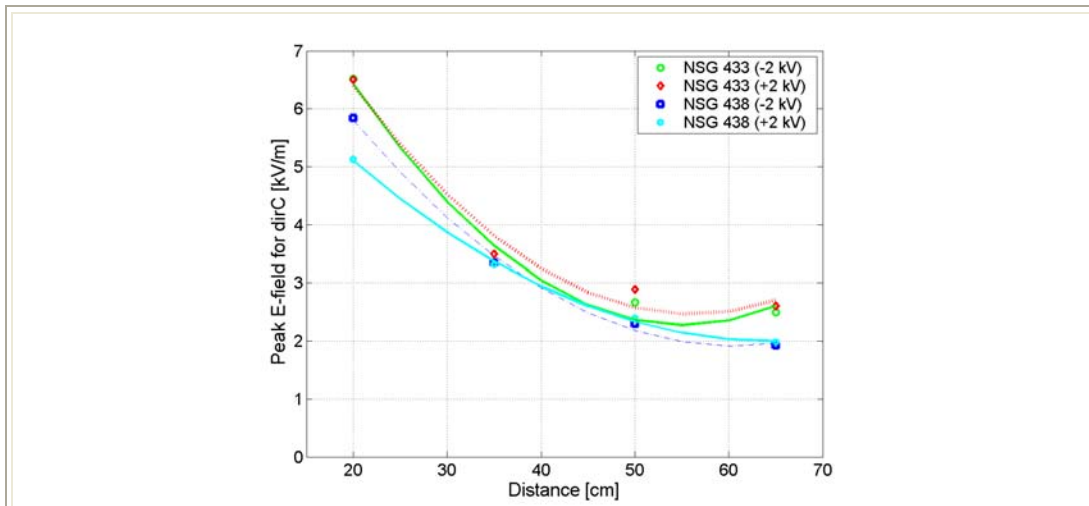
### 6.7 Μέγιστες τιμές ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) συναρτήσει της απόστασης για κάθε κατεύθυνση ξεχωριστά για εκφορτίσεις επαφής υπό τάσεις $\pm 2$ kV και $\pm 4$ kV με τις γεννήτριες NSG-433 και NSG-438.

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται τα γραφήματα των μέγιστων τιμών της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου συναρτήσει της απόστασης και για κάθε κατεύθυνση ξεχωριστά για εκφορτίσεις επαφής υπό τάσεις  $\pm 2$  kV και  $\pm 4$  kV με τις γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων NSG-433 και NSG-438.

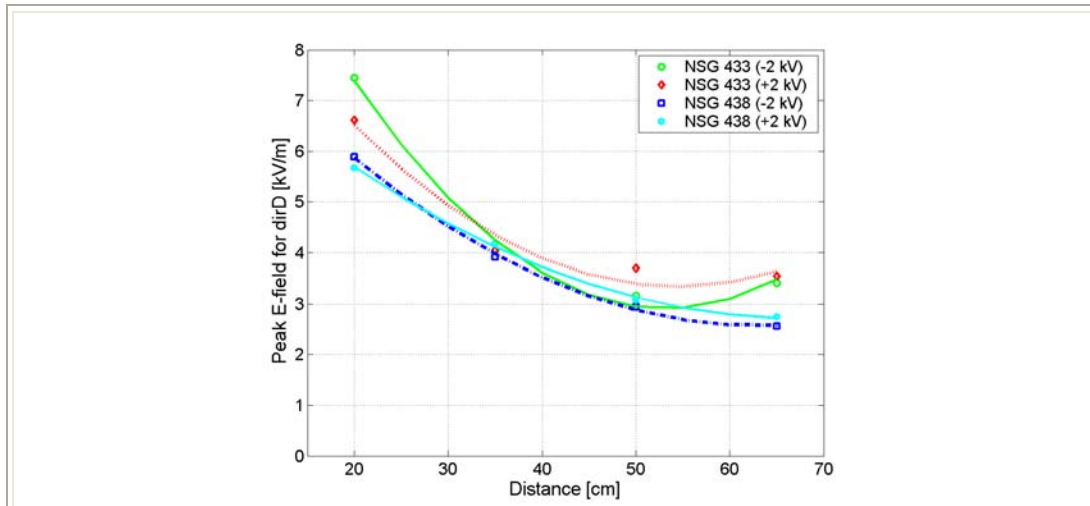
### 6.7.1 Συγκρίσεις για τάσεις φόρτισης $\pm 2$ kV



Σχήμα 6.145: Οι μέγιστες τιμές της έντασης  $E$  του ηλεκτρικού πεδίου συναρτήσει του χρόνου στην κατεύθυνση  $A$  και σε όλες τις αποστάσεις για εκφορτίσεις επαφής και με τις δύο γεννήτριες υπό τάσεις  $+2$  kV και  $-2$  kV.

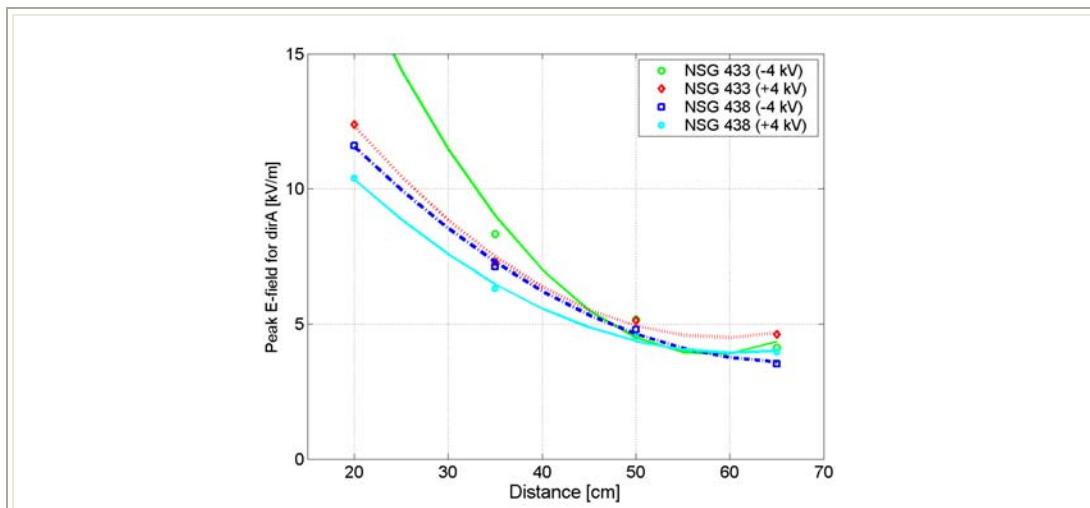


Σχήμα 6.146: Οι μέγιστες τιμές της έντασης  $E$  του ηλεκτρικού πεδίου συναρτήσει του χρόνου στην κατεύθυνση  $C$  και σε όλες τις αποστάσεις για εκφορτίσεις επαφής και με τις δύο γεννήτριες υπό τάσεις  $+2$  kV και  $-2$  kV.

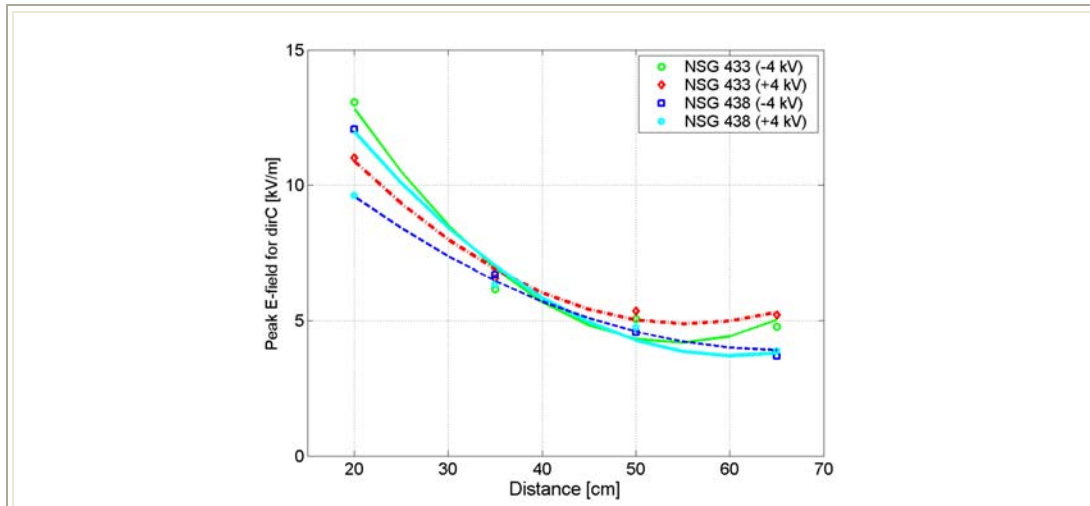


Σχήμα 6.147: Οι μέγιστες τιμές της έντασης  $E$  του ηλεκτρικού πεδίου συναρτήσει του χρόνου στην κατεύθυνση  $D$  και σε όλες τις αποστάσεις για εκφορτίσεις επαφής και με τις δύο γεννήτριες υπό τάσεις  $+2\text{ kV}$  και  $-2\text{ kV}$ .

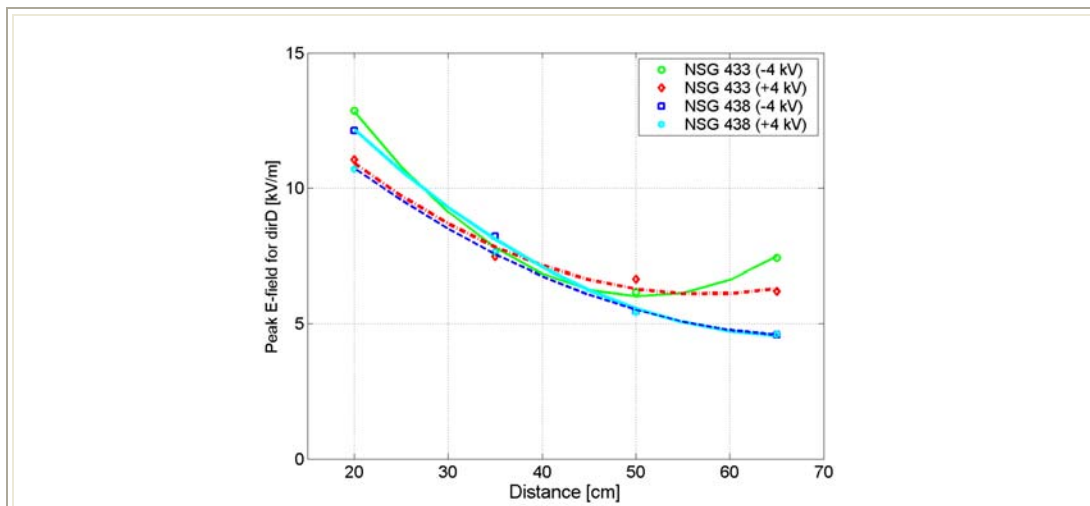
### 6.7.2 Συγκρίσεις για τάσεις φόρτισης $\pm 4\text{ kV}$



Σχήμα 6.148: Οι μέγιστες τιμές της έντασης  $E$  του ηλεκτρικού πεδίου συναρτήσει του χρόνου στην κατεύθυνση  $A$  και σε όλες τις αποστάσεις για εκφορτίσεις επαφής και με τις δύο γεννήτριες υπό τάσεις  $+4\text{ kV}$  και  $-4\text{ kV}$ .



Σχήμα 6.149: Οι μέγιστες τιμές της έντασης  $E$  του ηλεκτρικού πεδίου συναρτήσει του χρόνου στην κατεύθυνση  $C$  και σε όλες τις αποστάσεις για εκφορτίσεις επαφής και με τις δύο γεννήτριες υπό τάσεις  $+4\text{ kV}$  και  $-4\text{ kV}$ .



Σχήμα 6.150: Οι μέγιστες τιμές της έντασης  $E$  του ηλεκτρικού πεδίου συναρτήσει του χρόνου στην κατεύθυνση  $D$  και σε όλες τις αποστάσεις για εκφορτίσεις επαφής και με τις δύο γεννήτριες υπό τάσεις  $+4\text{ kV}$  και  $-4\text{ kV}$ .



## 6.8 Συμπεράσματα

- Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου μετρήθηκε χρησιμοποιώντας την πειραματική διάταξη που παρουσιάστηκε στο κεφαλαίο 4 και τις γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων. Στο 6.5 συγκριθήκαν οι κυματομορφές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε σχέση με το ρεύμα εκφόρτισης και παρατηρήθηκε ότι οι πολικότητες τους είναι ίδιες, αν και υπάρχουν διαστήματα όπου η πολικότητα αλλάζει απότομα. Το ηλεκτρικό πεδίο παρουσιάζει τη μέγιστη ισχύ του για τα πρώτα 30ns και για τις δυο πολικότητες. Επίσης παρατηρείται ότι το ηλεκτρικό πεδίο ξεκινάει με μια ευθεία γραμμή για τα πρώτα 3ns. Ο χρόνος αυτός είναι ο χρόνος που χρειάζεται το ηλεκτρικό πεδίο για να οδεύσει από το σημείο εκφόρτισης στον αισθητήρα μέτρησης του ηλεκτρικού πεδίου.
- Οι μέγιστες τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου και για τις δυο γεννήτριες NSG-433 και NSG-438, αλλά και για τις τρεις κατευθύνσεις παρουσιάστηκαν στο 6.7. Αρχικά παρατηρήθηκε ότι το πλάτος της μέγιστης τιμής της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου ελαττώνεται όσο αυξάνεται η απόσταση από το σημείο εκφόρτισης. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από την υπέρθεση στο οδεύον κύμα, του κύματος που ανακλάται στην αρχή της μεταλλικής πλάκας. Το γεγονός αυτό συμφωνεί πλήρως με τη μελέτη του καθηγητή D.Pommerenke σχετικά με τις συγκρίσεις του ηλεκτρικού πεδίου για μεταλλική πλακά τοποθετημένη οριζόντια, αλλά και κάθετα [28]. Επίσης παρατηρείται ότι και στις τρεις κατευθύνσεις η γεννήτρια NSG-433 παράγει μεγαλύτερο ηλεκτρικό πεδίο από τη γεννήτρια NSG-438 και για τις δυο πολικότητες. Αυτό εξηγείται από τη διαφορετική κατασκευή των δυο γεννητριών και προφανώς από τα διαφορετικά ρελέ, που η καθεμία διαθέτει. Συμπερασματικά, το παραγόμενο ηλεκτρικό πεδίο είναι διαφορετικό για τις δυο γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων.
- Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων για το ηλεκτρικό πεδίο, που παράγεται από τις δυο γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, παρατηρήθηκε ότι για την ίδια οριζόντια γειωμένη πλακά, για την ίδια τάση φόρτισης και για την ίδια απόσταση, αλλά για διαφορετική κατεύθυνση το παραγόμενο ηλεκτρικό πεδίο ήταν διαφορετικό. Τα πειράματα διεξήχθησαν σε τρεις κατευθύνσεις κάθετες μεταξύ τους (κατεύθυνση A, κατεύθυνση C, κατεύθυνση D). Οι συγκρίσεις των μέγιστων τιμών της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, κατά απόλυτη τιμή, για τις

τρεις κατευθύνσεις, για τις δυο γεννήτριες και για διαφορετικές τάσεις φόρτισης παρουσιάστηκαν στο 6.6.

- Από τις γραφικές παραστάσεις του 6.6 γίνεται προφανές ότι για την γεννήτρια NSG-438 και για πολικότητες  $\pm 2\text{kV}$  η κατεύθυνση, στην οποία η μέγιστη τιμή του ηλεκτρικού πεδίου είναι μεγαλύτερη ταξινομείται ως εξής: κατεύθυνση D  $\rightarrow$  κατεύθυνση A  $\rightarrow$  κατεύθυνση C, με την κατεύθυνση D να παρουσιάζει μεγαλύτερες μέγιστες τιμές ηλεκτρικού πεδίου. Ομοίως για τη γεννήτρια NSG-433 και για πολικότητες  $\pm 2\text{kV}$  η ταξινόμηση έχει ως εξής: κατεύθυνση A  $\rightarrow$  κατεύθυνση D  $\rightarrow$  κατεύθυνση C, με την κατεύθυνση D να παρουσιάζει μεγαλύτερες μέγιστες τιμές ηλεκτρικού πεδίου για απόσταση περίπου 50cm από το σημείο εκφόρτισης. Μια πιθανή αιτία για τα διαφορετικά παραγόμενα ηλεκτρικά πεδία σε διαφορετικές κατευθύνσεις μπορεί να είναι η κατασκευή του κυκλώματος, το οποίο παράγει διαφορετικό ηλεκτρικό πεδίο. Αυτό είναι κάτι στο οποίο θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή, επειδή ο προσανατολισμός της γεννήτριας ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων είναι πιθανόν να επηρεάζει τα αποτελέσματα στον εκάστοτε έλεγχο ενός δοκιμίου (EUT). Για παράδειγμα αν εκτελούμε έναν έλεγχο με τη γεννήτρια NSG-438 και το ελεγχόμενο δοκίμιο τοποθετηθεί στην κατεύθυνση C μπορεί να περάσει τον έλεγχο και να αποτύχει το ίδιο δοκίμιο αν τοποθετηθεί στην κατεύθυνση D, επειδή στην κατεύθυνση αυτή η μέγιστη τιμή του πεδίου είναι μεγαλύτερη.
- Όπως προαναφέρθηκε μπορεί μια γεννήτρια να παράγει διαφορετικό ηλεκτρικό πεδίο στην ίδια απόσταση και στην ίδια κατεύθυνση. Αυτό ερμηνεύεται από το γεγονός ότι κάθε γεννήτρια έχει διαφορετικό κύκλωμα το οποίο ανάλογα με τη θωράκιση που έχει η συσκευή παράγει διαφορετικό ηλεκτρικό πεδίο.
- Όμως και η ίδια γεννήτρια ανάλογα με την κατεύθυνση με την οποία μετράμε το ηλεκτρικό πεδίο που παράγει είναι διαφορετικό. Αυτό ερμηνεύεται από το γεγονός ότι η γεννήτρια έχει εσωτερικό κύκλωμα, το οποίο ανάλογα με τον προσανατολισμό του δίνει διαφορετικά αποτελέσματα ως προς το παραγόμενο ηλεκτρικό πεδίο.
- Το διαφορετικό ηλεκτρικό πεδίο, που παράγει η κάθε γεννήτρια έχει σαν αποτέλεσμα οι επαγόμενες τάσεις σε γειτνιάζοντα σημεία να είναι επίσης διαφορετικές. Αυτό συνεπάγεται ένα δοκίμιο (EUT) το οποίο εξετάζεται από τη μια γεννήτρια να περνάει το τεστ σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61000-4-2, ενώ

με την άλλη να αποτυγχάνει. Αυτό το γεγονός καταδεικνύει την αναγκαιότητα μελέτης του παραγόμενου ηλεκτρομαγνητικού πεδίου από τις διάφορες γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων, ώστε στην επόμενη αναθεώρηση του Προτύπου να υπάρξουν οδηγίες κατασκευής των γεννητριών αυτών, που θα καθορίζουν τα όρια τα οποία θα πρέπει να βρίσκονται οι τιμές των παραγόμενων πεδίων.

# Κεφάλαιο 7

## Η επόμενη μέρα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάστηκαν μετρήσεις και συγκριτικά αποτελέσματα του παραγόμενου ηλεκτρικού πεδίου χρησιμοποιώντας δυο γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων. Γενικότερα η μέτρηση του παραγόμενου ηλεκτρομαγνητικού πεδίου είναι μια πρόκληση. Όπως αναφέρεται στη διεθνή βιβλιογραφία [20] τα αποτελέσματα των μετρήσεων μπορεί να παρουσιάζουν μεγάλες αποκλίσεις ανάλογα με το είδος της πειραματικής διάταξης και τα probes που θα χρησιμοποιηθούν.

Οι μετρήσεις οι οποίες διεξήχθησαν με τον αισθητήρα ηλεκτρικού πεδίου κατασκευής του καθηγητή του Πανεπιστημίου Missouri-Rolla, David Pommerenke και με τον ομοαξονικό προσαρμοστή ήταν τοποθετημένος σε γειωμένη μεταλλική πλάκα διαστάσεων  $1,5 \times 1,5 \text{ m}^2$  σε οριζόντια θέση (HCP). Στο μέλλον θα πρέπει για την ίδια διάταξη που περιγράφηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία να γίνουν μετρήσεις με τον ίδιο αισθητήρα και όταν η γειωμένη μεταλλική πλάκα διαστάσεων βρίσκεται σε κατακόρυφη θέση (VCP).

Οι μετρήσεις για το παραγόμενο ηλεκτρικό πεδίο από ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις, χρησιμοποιώντας πάλι τις ίδιες γεννήτριες και με τον ομοαξονικό προσαρμοστή τοποθετημένο σε γειωμένη μεταλλική πλάκα, θα πρέπει να γίνουν και χρησιμοποιώντας διαφορετικού τύπου αισθητήρες, ώστε να είναι δυνατόν να γίνουν συγκρίσεις μεταξύ των αποτελεσμάτων.

Επιπρόσθετα στα εργαστηριακά πειράματα που θα ακολουθήσουν θα πρέπει να γίνουν μετρήσεις και σε μεγαλύτερες αποστάσεις από το σημείο εκφόρτισης, ώστε η μεταβολή του ηλεκτρικού πεδίου συναρτήσει της απόστασης να διερευνηθεί και να βρεθεί βάσει ποιου παράγοντα φθίνει.

Τέλος, πεδιακή ανάλυση και προσομοίωση της διάταξης θα μπορούσαν να γίνουν μέσω

κατάλληλου υπολογιστικού πακέτου, ώστε να διαπιστωθούν και να εξηγηθούν τυχόν αποκλίσεις μεταξύ θεωρίας και πειράματος.

---

# Βιβλιογραφία

---

- [1] Paul A. Chatterton – Michael A. Houlden, “Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα (EMC) - Η εφαρμογή της ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας στον πρακτικό σχεδιασμό”, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη 1992.
- [2] Theodore Dangelmayr, “ESD Program Management- A Realistic Approach to Continuous Measurable Improvement in Static Control”, Van Noshand Ranhold, New York, 1990.
- [3] European Standard EN 61000-4-2: “Electromagnetic Compatibility (EMC), Part 4: Testing and measurement techniques, Section 2: Electrostatic discharge immunity test – Basic Emc Publication”, 2001.
- [4] ΕΛΟΤ EN 61000.06.01: “Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα (EMC): Μέρος 6.1: Γένια Πρότυπα – Ατρωσία για κατοικήσιμα, εμπορικά και ελαφρής βιομηχανίας περιβάλλοντα”, 2001.
- [5] Paul Cartwright, “Electrostatic Hazards in the aerosol industry”, διαθέσιμο στη διεύθυνση <http://www.chilworth.co.uk/publications/publications.asp>.
- [6] Kai Esmark, Harald Gossner, Wolfgang Stadler, “Advanced Simulation Methods for ESD Protection Development”, Elsevier, 2003.
- [7] Stephen L. Fowler, William G. Klein, Alrry Fromm, “Procedure for the Design Analysis and Auditing of Static Control Flooring/Footwear Systems διαθέσιμο στη διεύθυνση: <http://www.esdjournal.com/techpaper/sfowler/esd97/esd97.htm>.
- [8] Ariadna Kaplan, Bob McReynolds, “Dielectric characteristics of materials- Electrostatic Discharge”, November 2002, διαθέσιμο στη διεύθυνση: <http://www2.sjsu.edu/faculty/selvaduray/page/papers/mate210/electrostatic.pdf>.
- [9] Martin Lutz, “The determination of the immunity to electrostatic discharge ‘ESD’ with transient 1000 generator”, EMC Partner, Seminar 1999.
- [10] European Standard IEC 61000-4-2: “Electromagnetic Compatibility (EMC), Part4: Testing and measurement techniques, Section 2: Electrostatic discharge immunity test – Basic EMC Publication”, 2001.

- [11] Γεώργιος Π. Φώτης, “Ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα και απωσία εξοπλισμού ισχύος από ηλεκτροστατική εκφόρτιση”, Ενδιάμεση Κρίση του Υπομήφιου Διδάκτορα Γεωργίου Π. Φώτη, Ιούλιος 2004.
- [12] IEC 801-2, Electromagnetic compatibility for industrial process measurement and control equipment, Part 2: Electrostatic discharge requirement, 1991.
- [13] IEC 1000-4-2, International Standard, 1995.
- [14] Kai Wang, David Pommerenke, Ramachandran Chundru, Tom Van Doren, James L. Drewniak, Ashwin Shashindranath, “Numerical Modelling of Electrostatic Discharge Generators”, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 45, no.2, May 2003, pp. 258-271.
- [15] ANSI C63 16\_1993\_American National Standard guide for ESD test methodologies and criteria for electronic equipment, 1993.
- [16] P. F. Wilson and M. T. Ma, “Field radiated by electrostatic discharges”, IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility, vol. 33, no. 1, Feb. 1991, pp. 10 – 18.
- [17] O. Fujiwara “An analytical approach to model indirect effect caused by electrostatic discharge”, IEICE Transactions on Communications, vol. E79-B, no.4, April 1996, pp. 483 – 489.
- [18] Roman Jobara, David Pommerenke, D. Karkashadze, P. Shubitidze, R. Zaridze, S. Frei, Martin Aidam “Computer Simulation of ESD from voluminous objects compared to transient fields of humans”, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 42, no.1, February 2000, pp. 54-65.
- [19] D. Pommerenke, ESD: What has been achieved, what is less understood, IEEE Symposium on EMC, Minneapolis, August 2002, pp. 895-900.
- [20] Jan Sroka and Leuchtmann Pascal, “Transient field simulation of electrostatic discharge (ESD) in the calibration setup (acc. IEC 61000-4-2)”, IEEE International Symposium on EMC, 21-25 August 2000, pp. 443-448.
- [21] Jan Sroka and Leuchtmann Pascal, “Enhanced field simulations and measurements of the ESD calibration setup”, IEEE International Symposium on EMC, 13-17 August 2001, pp.1273-1278.
- [22] Instruction manual for the electrostatic discharge generator NSG-433, Instruments Schaffner, Publ. 1303E.

- [23] Instruction manual for the electrostatic discharge generator NSG-438, Instruments Schaffner, Publ. 601-242A.
- [24] G. P. Fotis, I. F. Gonos, I. A. Stathopoulos, “An Approach to the Better Understanding of the Experimental Setup for the Verification of the ESD Generators”, έγινε δεκτό και θα παρουσιαστεί στο Διεθνές Συνέδριο Υψηλών Τάσεων (ISH 2005) στις 25-29 Αυγούστου 2005 στο Πεκίνο.
- [25] Jan Sroka and Leuchtmann Pascal, “Transient field simulation of electrostatic discharge (ESD) in the calibration setup (acc. IEC 61000-4-2)”, IEEE International Symposium on EMC, 21-25 August 2000, pp. 445.
- [26] Graziano Cerri, Simona Chiarandini, Simone Constantini, Roberto De Leo, Valter Mariani Primiani and Paola Russo, “Theoretical and experimental characterization of transient electromagnetic fields radiated by electrostatic discharge (ESD) currents”, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 44, no.1, February 2002, pp. 139-147.
- [27] Pommerenke D., Vandoren T.P., Wang K., “ESD currents and fields on the VCP and the HCP modeled using quasi-static approximations”, IEEE International Symposium on EMC, 2002, pp. 81-86.
- [28] Frei S., Pommerenke D., “A transient field measurement system to analyze the severity and occurrence rate of electrostatic discharge (ESD)”, Journal of Electrostatics, vol. 44, issues 3-4, September 1998, pp. 191-203.



## Παράρτημα

### Αισθητήρας μέτρησης έντασης ηλεκτρικού πεδίου

#### Π.1 Μεθοδολογία υπολογισμού πεδίου

Συχνά η χρήση του όρου ‘μη-σκόπιμη ακτινοβολία’ (unintended radiation) υπονοεί πως δε θα έπρεπε να υπάρχει ακτινοβολία προερχόμενη από τις γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων (ESD simulators). Αυτό όμως είναι λάθος, καθώς κάθε ηλεκτροστατική εκφόρτιση προκαλεί ισχυρά πεδία. Τα πεδία των γεννητριών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων πρέπει να ταιριάζουν με τα πεδία της πραγματικής ηλεκτροστατικής εκφόρτισης χωρίς όμως να προκαλούν πεδία μεγαλύτερα ή διαφορετικά από αυτά.

Είναι δυνατόν να βρεθούν ορισμένα δεδομένα τα οποία να αφορούν διακριβωμένες μετρήσεις πεδίου, αλλά είναι ανεπαρκή, ενώ η ευρέως διαθέσιμη τεχνολογία για τις ανάγκες μας είναι και αυτή με τη σειρά της ανεπαρκής ή ακόμη και πολύ ακριβή. Ακόμη και εάν όλες οι γεννήτριες ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων έδιναν παρόμοιο ρεύμα, τα πεδία είναι δυνατόν να διαφέρουν. Έχουν παρατηρηθεί διαφορές στα πεδία και για το λόγο αυτό χρειάζεται συγκεκριμενοποίησή τους. Δύο είναι τα προβλήματα τα οποία πρέπει να ξεπεραστούν:

1. Χρειάζεται μία μεθοδολογία η οποία να είναι δυνατόν να επαναληφθεί και να ανιχνευθεί, να είναι εύκολη στην εφαρμογή της και όχι πολύ ακριβή.
2. Χρειάζεται να τεθούν και να δικαιολογηθούν συγκεκριμένες τιμές πεδίου και επιτρεπόμενες διακυμάνσεις.

Το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο είναι δυνατόν να μετρηθούν σε κοντινές ή μακρινές αποστάσεις, στο πεδίο του χρόνου ή της συχνότητας, όταν οι αισθητήρες είναι πάνω σε γειωμένη μεταλλική πλάκα ή στον ελεύθερο χώρο. Καθώς ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις μπορούν να προκύψουν πολύ κοντά στο δοκίμιο, χρειάζεται μέτρηση του πεδίου σε κοντινή και ίσως και σε μακρινή απόσταση. Για το λόγο αυτό πρέπει να μετρούνται το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο.

Λόγω της φύσεως των παλμών ηλεκτροστατικών εκφορτίσεων και της διαθεσιμότητας παλμογράφων (ένας γρήγορος παλμογράφος ήδη χρειάζεται για το ρεύμα) προτιμάται η λήψη μετρήσεων στο πεδίο του χρόνου. Προς απλούστευση της

διαδικασίας θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν αισθητήρες τοποθετημένοι σε γειωμένη πλάκα. Οι αισθητήρες απαιτούν ζεύξη με οπτική ίνα προς αποφυγή προβλημάτων τα οποία συνήθως απορρέουν από τα καλώδια. Αυτό βέβαια αυξάνει σημαντικά το κόστος.

Σε μια τέλεια γειωμένη πλάκα, οι αισθητήρες μετρούν το παράλληλο μαγνητικό πεδίο το οποίο είναι ανάλογο της πυκνότητας του κάθετου στο μαγνητικό πεδίο ρεύματος και για ηλεκτρικό πεδίο την πυκνότητα φορτίου που είναι ανάλογη του κάθετου στην πλάκα ηλεκτρικού πεδίου.

Για να επιτευχθεί επίπεδη απόκριση συχνότητας από περίπου τα 2MHz έως και πάνω από το 1GHz χρειάζεται ολοκλήρωση. Βέλτιστο είναι να εφαρμοσθούν οι ολοκληρώσεις στο εσωτερικό των αισθητήρων ενώ άλλες εναλλακτικές είναι η αριθμητική ολοκλήρωση.

## Π.2 Μέτρηση πεδίου

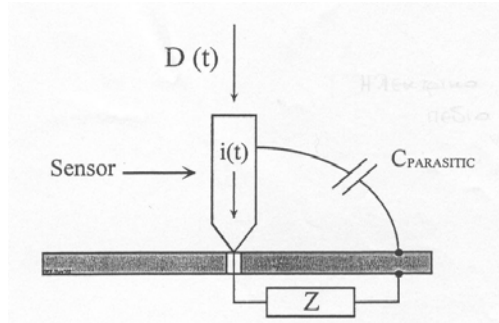
Τα προς μέτρηση σήματα είναι σύντομα, ισχυρά, μη επαναλαμβανόμενα, με μεγάλο εύρος ζώνης και μικρό χρόνο ανόδου. Τα σήματα αυτά πρέπει να μετρηθούν τόσο σε κοντινές όσο και σε μακρινές αποστάσεις και ξεχωριστά για το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο.

Η ευαισθησία τους, το όριο κορεσμού και το εύρος ζώνης καθορίζουν το σχεδιασμό του αισθητήρα για αυτές τις πεδιακές μετρήσεις. Μία πολύ υψηλή συχνότητα κατώτατου ορίου προκαλεί παραμορφώσεις. Η μέγιστη τιμή του μαγνητικού πεδίου προκύπτει συνήθως μέσα στα πρώτα 10ns. Το απαιτούμενο εύρος ζώνης για τις μετρήσεις είναι 2MHz – 2GHz. Η συχνότητα ανώτερου ορίου καθορίζεται από τη σωστή μέτρηση ενός μέγιστου αριθμού παλμών που ακολουθούν και του χρόνου ανόδου. Με αυτόν τον αισθητήρα είναι 2GHz.

Το απαιτούμενο δυναμικό εύρος για τον αισθητήρα του μαγνητικού πεδίου είναι 0,1 έως 200A/m και 20 έως 20000V/m για το ηλεκτρικό πεδίο.

### Π.3.1 Θεωρία για τον αισθητήρα μέτρησης ηλεκτρικού πεδίου

Ο αισθητήρας μέτρησης ηλεκτρικού πεδίου (D-Dot) παρουσιάζεται στο Σχήμα Π.1.



Σχήμα Π.1: Η σύζευξη του σήματος του πεδίου στον αισθητήρα.

Όμοια με τον αισθητήρα μαγνητικού πεδίου το πραγματικό πεδίο προκαλεί μια διαφοροποίηση. Η διαφοροποίηση αυτή αντισταθμίζεται ξανά από έναν ενσωματωμένο ολοκληρωτή. Αυτό για τον αισθητήρα του ηλεκτρικού πεδίου γίνεται από την παράσιτη χωρητικότητα  $C_{\text{parasitic}}$  και την αντίσταση  $Z$ .

Συγκρινόμενη με τον αισθητήρα μαγνητικού πεδίου η κατάσταση είναι πιο ευνοϊκή τώρα:

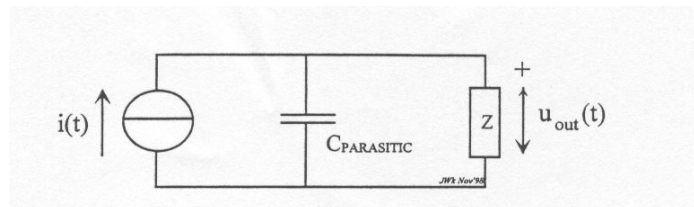
- Η εμπέδηση  $Z$  πρέπει να είναι μεγάλη για να πετύχει μια χαμηλή συχνότητα, το οποίο μπορεί να επιτευχθεί με ένα κύκλωμα μετατροπής ενεργούς εμπέδησης.
- Ο αισθητήρας του ηλεκτρικού πεδίου δεν έχει την τάση να λαμβάνει μαγνητικά πεδία. Για αυτό το λόγο δεν χρειάζεται ασπίδα προστασίας γύρω από τον αισθητήρα.
- Η ευαισθησία δεν είναι πρόβλημα: Οι δυνάμεις του πεδίου σχετιζόμενες με την ηλεκτροστατική εκφόρτιση είναι τόσο μεγάλες ( $10\text{V/m} \dots 20000\text{V/m}$ ), που ένα πολύ μικρό στοιχείο αισθητήρα (εδώ χρησιμοποιήθηκε ένα μονοπολικό μήκους περίπου  $2\text{mm}$ ) είναι επαρκές.
- Η απόκριση συχνότητας αυτού του μονοπολικού είναι πολύ υψηλότερη από την μέγιστη συχνότητα που μας ενδιαφέρει: Δεν χρειάζεται συντονισμός της απόκρισης.

Ο σχεδιασμός ενός αισθητήρα ηλεκτρικού πεδίου παρουσιάζει το πρόβλημα σχεδιασμού ενός μετατροπέα εμπέδησης μεγάλου εύρους.

Το ηλεκτρικό πεδίο προκαλεί ένα ρεύμα που είναι ανάλογο της μεταβολής του ηλεκτρικού πεδίου με το χρόνο. Το ρεύμα εξόδου  $i(t)$  μπορεί να υπολογιστεί με την εξίσωση:

$$i(t) = \int_A \frac{d}{dt} D(t) dA$$

Το διάγραμμα του κυκλώματος του αισθητήρα παρουσιάζεται στο Σχήμα Π.2.

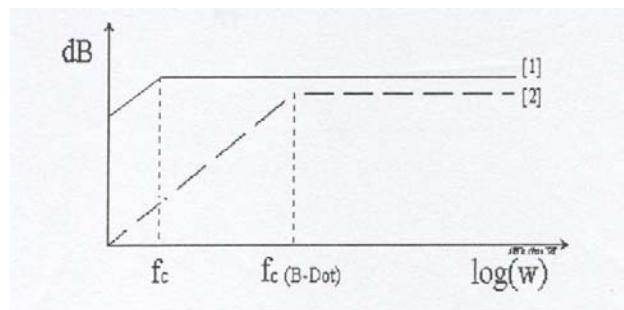


Σχήμα Π.2: Το κυκλωματικό διάγραμμα του αισθητήρα.

Η τάση εξόδου μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση:

$$u_{out}(t) = i(t) \cdot \frac{Z}{Zj\omega C + 1}$$

Το θεωρητικό μέγεθος της συνάρτησης μεταφοράς συναρτήσει της συχνότητας για τον αισθητήρα ηλεκτρικού πεδίου φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα.



Σχήμα Π.3: Η συνάρτηση μεταφοράς.

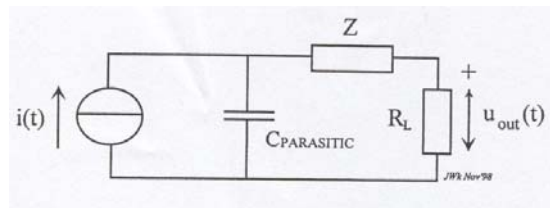
Στο παραπάνω γράφημα η κρίσιμη συχνότητα ( $f_c$ ) του αισθητήρα του ηλεκτρικού πεδίου (καμπύλη [1]) συγκρίνεται με την κρίσιμη συχνότητα του αισθητήρα μαγνητικού πεδίου (καμπύλη [2]). Η χαρακτηριστική του αισθητήρα του μαγνητικού πεδίου (B-Dot) δείχνει τον αισθητήρα με τον ενισχυτή του αλλά χωρίς αντιστάθμιση της συχνότητας του. Η διάφορα μεταξύ των συχνοτήτων χαμηλών ορίων φαίνεται

ξεκάθαρα. Λόγω της χαμηλής συχνότητας διακοπής δεν χρειάζεται καμία αντιστάθμιση συχνότητας για τον αισθητήρα ηλεκτρικού πεδίου.

Η συχνότητα χαμηλότερου ορίου ελαττώνεται με αύξηση της ικανότητας λήψης του πεδίου ή με αύξηση της εμπέδησης  $Z$ . Οι διαστάσεις του αισθητήρα πρέπει να είναι μικρές συγκρινόμενες με το μήκος κύματος, που έχει ως αποτέλεσμα η αύξηση της εμπέδησης να μπορεί να επιτευχθεί μόνο με την προσθήκη μιας αντίστασης φορτίου.

Για την επίτευξη μιας χαμηλής συχνότητας η  $R_L$  επιλέγεται 220 kΩ.

Στο Σχήμα Π.3 φαίνεται μια αντίσταση φορτίου που χρησιμοποιείται για την αύξηση της εμπέδησης  $Z$ .



Σχήμα Π.4 :Αύξηση εμπέδησης με αντίσταση φορτιού.

Η συχνότητα χαμηλότερου ορίου είναι η συχνότητα του αισθητήρα και δίνεται από την εξίσωση:

$$f_c = \frac{1}{2\pi(Z + R_L)C}$$

Η συχνότητα υψηλότερου ορίου καθορίζεται από τις διαστάσεις του αισθητήρα, τα παράσιτα των εξαρτημάτων, τις προδιαγραφές μετάδοσης του ενισχυτή και τα καλώδια μέτρησης.

### Π.3.2 Κατασκευή του αισθητήρα μέτρησης ηλεκτρικού πεδίου

Ο αισθητήρας ηλεκτρικού πεδίου δημιουργείται με το GaAs-MESFet τρανζίστορ CFY-30 της Siemens. Το τρανζίστορ χρησιμοποιείται ως μετατροπέας εμπέδησης. Έχει μια πολύ μεγάλη εμπέδηση εισόδου και μια εμπέδηση εξόδου περίπου ίση με 50 Ohm. Το τρανζίστορ παρέχει μια ενίσχυση του εύρους φάσματος για τη λήψη του σήματος. Τα 50 Ω εξόδου αντιστοιχούν στον αισθητήρα για τον εξοπλισμό μέτρησης. Για μια επίπεδη συχνότητα τάξεως έως 2 GHz ήταν πολύ σημαντικό να γειωθεί η πηγή του τρανζίστορ όσο το δυνατόν πιο άμεσα.

Η μηχανική παράμετρος του αισθητήρα ηλεκτρικού πεδίου είναι το μήκος λήψης του πεδίου. Αυτό καθορίζει την ευαισθησία του αισθητήρα. Το μήκος που διαλέχθηκε για

τον αισθητήρα ήταν 2 mm. Η ευαισθησία ενός λήπτη των 2 mm καθορίζεται με μετρήσεις από τον παλμογράφο.

Το τρανζίστορ χρησιμοποιείται σε κύκλωμα κοινής πηγής. Σε αυτή τη διάταξη η πύλη χρειάζεται αρνητική τάση. Για τη δημιουργία της αρνητικής τάσης χρησιμοποιείται ένας μετατροπέας τάσης μεταβλητού πυκνωτή.

Η παροχή τάσης έχει συζευχθεί από καλώδιο μέτρησης RF από τον ίδιο συζεύκτη DCRF, που χρησιμοποιήθηκε για τον αισθητήρα του μαγνητικού πεδίου. Η είσοδος DC για τον συζεύκτη DCRF έχει τροποποιηθεί. Δυο πυκνωτές είναι τοποθετημένοι στο καλώδιο SMA στο σασί για να εμποδίσουν τη σύζευξη HF.

Η τάση καθορίστηκε στα +4V με ένα ρυθμιστή τάσης LM 317. Το ρεύμα του τρανζίστορ έχει οριστεί στα 15 mA με ένα μετρητή 50 kΩ για όλους τους αισθητήρες. Αντίσταση 1 kΩ περιορίζει το ρεύμα παροχής για τον μετατροπέα τάσης μεταβλητού πυκνωτή και η αντίσταση αυτή δεν αλλάζει την εμπέδηση εξόδου του αισθητήρα, η οποία καθορίζεται από το τρανζίστορ.

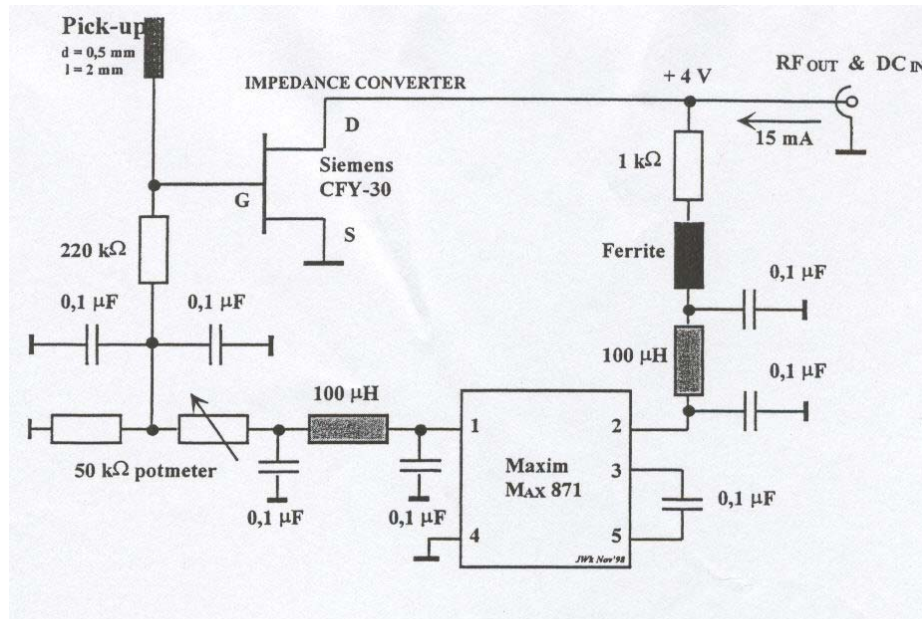
Για τον περιορισμό της συχνότητας ταλάντωσης του θορύβου στον αισθητήρα (600kHz) χρησιμοποιούνται φίλτρα και στις δυο πλευρές του μετατροπέα τάσης μεταβλητού πυκνωτή. Τα φίλτρα κατασκευάζονται με ένα πηνίο και δυο πυκνωτές όπως φαίνεται στο Σχήμα Π5.

Φερρίτες, πυκνωτές και επαγωγείς χρησιμοποιούνται για να προστατεύουν όλα τα συνεχούς ρεύματος καλώδια από υψηλής συχνότητας σήματα. Για να επιτευχθεί μια πολύ χαμηλή κρίσιμη συχνότητα χρησιμοποιείται αντίσταση 220kΩ.

Το σήμα εξόδου του αισθητήρα είναι αρκετά μεγάλο ώστε να μετρηθεί με παλμογράφο. Ένας εξωτερικός ενισχυτής μπορεί να προστεθεί για μεγαλύτερη ενίσχυση σήματος. Ο ενισχυτής που σχεδιάστηκε για τις πρώτες μετρήσεις του αισθητήρα του μαγνητικού πεδίου μπορεί να χρησιμοποιηθεί και παρουσιάζεται παρακάτω.

Ο αισθητήρας ηλεκτρικού πεδίου δεν έχει την τάση να λαμβάνει μαγνητικά πεδία και τοποθετείται στην ίδια θήκη που χρησιμοποιήθηκε και για τον αισθητήρα μαγνητικού πεδίου. Το κύκλωμα προστατεύεται και είναι πιο εύκολο να χειριστεί με αυτόν τον τρόπο. Το βασικό κύκλωμα του αισθητήρα αποτελείται από εξαρτήματα SMD που μοντάρονται πάνω στην πλακέτα που χρησιμοποιείται ως κάλυμμα του αισθητήρα. Ο αισθητήρας στερεώνεται με έναν ισχυρό μαγνήτη.

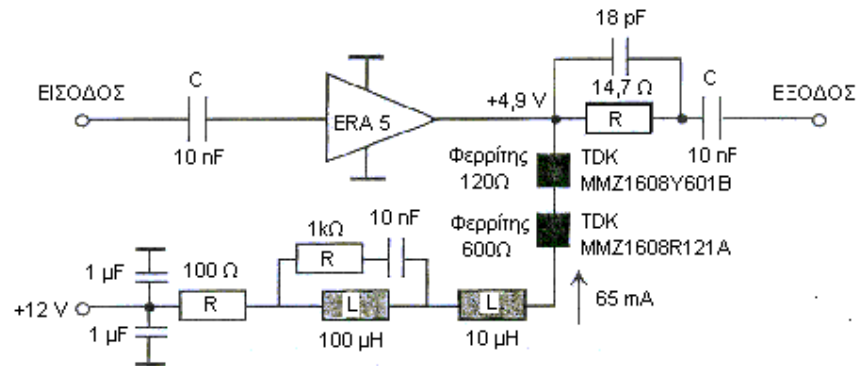
Κατά την κατασκευή του αισθητήρα έχουν ληφθεί πολύ καλές προφυλάξεις από ηλεκτροστατική εκφόρτιση. Υπάρχει ο κίνδυνος καταστροφής της κατασκευής ακουμπώντας την. Για να μην συμβεί αυτό, τοποθετείται ένα PVC κάλυμμα, το οποίο αποτρέπει την επαφή του τρανζίστορ ενώ αυτό χρησιμοποιείται και συγχρόνως τον κίνδυνο καταστροφής του. Επιπλέον το PVC κάλυμμα βελτιώνει λίγο και την ευαισθησία. Το κύκλωμα του αισθητήρα φαίνεται στο Σχήμα Π.5.



Σχήμα Π.5: Το κύκλωμα του αισθητήρα.

### Π.3.3 Ο ενισχυτής

Η χαμηλή ευαισθησία του probe καθιστά απαραίτητη τη χρήση ενισχυτή, έτσι ώστε να παρέχεται ικανοποιητικό σήμα στον παλμογράφο για μετρήσεις μεταβατικών σημάτων. Ο ενισχυτής έχει κέρδος 2 GHz στην ένταση επιπέδου συχνότητας με χαμηλό θόρυβο και 50 Ω έξοδο. Το κύκλωμα του ενισχυτή παρουσιάζεται στο Σχήμα Π.9.



Σχήμα Π.9: Το κύκλωμα του ενισχυτή.

Το ενεργό στοιχείο είναι το ολοκληρωμένο ERA-5-SM, το οποίο χαρακτηρίζεται από υψηλό κέρδος και χαμηλό θόρυβο. Ένα κύκλωμα DC σύζευξης παρέχει ρεύμα 65 mA για τον ενισχυτή. Ένα σύνθετο δίκτυο χρησιμοποιείται για την απόζευξη του RF σήματος και της DC τροφοδοσίας. Αποτελείται από φερρίτες και πηνία. Ο αντιστάτης των 100Ω περιορίζει το συνεχές ρεύμα. Ένας ρυθμιστής τάσης (LM 7812) τροφοδοτεί με συνεχή τάση 12V (χρησιμοποιείται και διόδος για προστασία). Οι πυκνωτές αποκλεισμού εξασφαλίζουν την απουσία DC στην είσοδο του ομοαξονικού και στην έξοδο. Η γείωση του ERA-5-SM είναι πολύ σημαντική. Πρέπει να γειωθεί απ' ευθείας στην ακίδα σύνδεσης. Για το λόγο αυτό μία μικρή οπή δημιουργήθηκε στην πλακέτα και ο ενισχυτής τοποθετήθηκε ανάποδα στο κάτω μέρος αυτής, πλησίον της οπής, επιτυγχάνοντας έτσι άμεση γείωση.